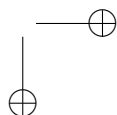
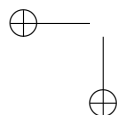
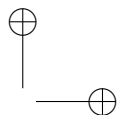
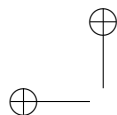


# **Sviluppo e calibrazione di modelli di danneggiamento plastico duttile**

in acciai strutturali per tubi da pipeline per il  
trasporto di gas e petrolio



# **Sviluppo e calibrazione di modelli di danneggiamento plastico duttile**

in acciai strutturali per tubi da pipeline per il  
trasporto di gas e petrolio

TESI di DOTTORATO

sostenuta dal candidato presso l'Università di Cagliari  
il giorno 26 febbraio 2008

Andrea MEDDA

XX Ciclo del Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale  
Università degli Studi di Cagliari

Questa tesi viene presentata su proposta del Tutore scientifico:

Prof. Ing. Francesco Ginesu

Commissione:

Prof. Fabrizio Pilo, Università di Cagliari

Prof. Andrea Poggialini, Università Arcavacata di Rende

Prof. Massimo Morbidelli, Politecnico di Milano

Prof. Abel Solera Solera, Università di Valencia

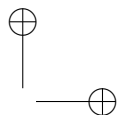
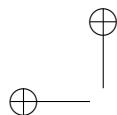
Copyright © 2007 by A. Medda

All rights reserved. No part of the material protected by this copyright notice may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without the prior permission of the author.

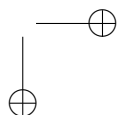
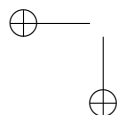
Tutti i diritti riservati. Nessuna parte del materiale coperto dal presente copyright può essere riprodotta o utilizzata in qualunque forma o con qualunque mezzo, elettronico o meccanico, compresa la registrazione e le fotocopie, senza il permesso scritto dell' autore.

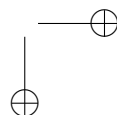
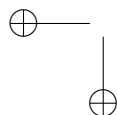
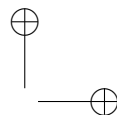
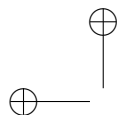
ISBN ??-????-???-?

Author email: [medda@dimeca.unica.it](mailto:medda@dimeca.unica.it)



*A chi mi vuol bene*







## Ringraziamenti

In questi anni ho avuto la fortuna di incontrare tante persone che mi hanno regalato molto del loro tempo, della loro amicizia, che mi hanno dato il loro aiuto personale, umano, e tanto altro. Peccato che io non abbia saputo ricambiare sempre con la stessa loro spontaneità.

Vorrei ringraziare prima di tutto il mio *Tutor*, il Prof. Francesco Ginesu. Nonostante i suoi tanti impegni non mi ha mai fatto mancare il suo supporto, facendo sempre in modo che non venissero meno le condizioni perché il mio lavoro potesse avanzare nel migliore dei modi.

Di primaria importanza è stato l'indirizzo che il responsabile scientifico del mio progetto, il Dr. Ing. Antonio Baldi, mi ha sempre pazientemente dato nel corso di questi tre anni, indicandomi ogni volta la giusta *pista* da seguire, soprattutto quando la mia inesperienza affievoliva il mio entusiasmo. Di tutto ciò non sarò mai abbastanza grato e riconoscente.

Grazie al Prof. Filippo Bertolino che ha messo a disposizione il frutto del suo lavoro e della sua esperienza, consentendomi di usare il suo software DIC-FEM, permettendo alla parte sperimentale del mio lavoro di prendere una piega positiva inaspettata.

Un ringraziamento particolare va a tutti i colleghi ed amici che ho avuto la fortuna e il piacere di conoscere al LMT-Cachan presso l'École Normale Supérieure di Cachan, con i quali ho trascorso sei mesi memorabili. In particolare vorrei ringraziare il Prof. François Hild, il Prof. Stéphane Roux ed in modo davvero speciale il Prof. emerito Jean Lémaitre per l'amicizia ed i tanti consigli preziosissimi di cui mi ha sempre fatto dono con amabile delicatezza. Il loro contributo al mio lavoro è stato notevole e determinante.

ii RINGRAZIAMENTI

Inoltre vorrei ringraziare per il fondamentale contributo tutto il personale tecnico ed amministrativo del Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell’Università di Cagliari.

Sono particolarmente grato al Centro Sviluppo Materiali di Castel Romano, in particolare all’Ing. Giuseppe Demofonti, per la stima e la fiducia manifestate nel corso di questi anni nei riguardi dell’Università di Cagliari. Infatti il lavoro che segue, è stato proposto, finanziato e condotto in stretta collaborazione con questo Centro, uno dei pochi dell’area della ricerca privata in Italia che si propone ai massimi livelli sulla scena internazionale.

Un grazie di cuore a tutti i colleghi ed amici che mi hanno sempre fatto vivere e lavorare in un ambiente sereno e stimolante, Paola, Carla, Natasha, Silvia, Michele, Bruno, Stefano, Alessio, Maurizio, Roberto, Carlo Enrico, Diego, Sergio, Alberto.

Grazie agli amici di sempre<sup>1</sup> dei quali, nonostante le circostanze ci tengano lontani per lunghi periodi di tempo, riesco a sentire ogni volta più vivo che mai l’affetto sincero.

Alla mia famiglia semplicemente grazie.

Ma in modo *specialissimo* grazie alla donna<sup>2</sup> che ha avuto la pazienza ed il coraggio di chiedersi sinceramente se mi ama.

Cagliari,  
Dicembre 2007

Andrea Medda

---

<sup>1</sup>Sapete chi siete.

<sup>2</sup>Sì, tu...





# Indice

<b>Ringraziamenti</b>	<b>i</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2 Implementazione agli elementi finiti del modello CDM.</b>	<b>5</b>
2.1 Implementazione del modello continuous damage mechanics.	5
2.2 Modellazione numerica di alcune geometrie. . . . .	6
2.2.1 Provino liscio intagliato a sezione cilindrica. Round notched bar. . . . .	6
2.2.2 Provino piatto a sezione rettangolare. . . . .	6
<b>3 Identificazione della legge di incrudimento.</b>	<b>17</b>
3.1 Metodo della stima locale tramite DIC. . . . .	18
3.1.1 Modello 1D. . . . .	18
3.1.2 Modello 2D. . . . .	22
3.2 Identificazione automatizzata. . . . .	25
3.2.1 Metodo $T_1$ . Minimizzazione delle differenze dal cam- po di spostamenti sperimentali. . . . .	28
3.2.2 Metodo $T_2$ . Minimizzazione delle reazioni nodali, imposto il campo di spostamenti sperimentali. . . . .	31
3.3 Confronto dei risultati. . . . .	32
3.4 Conclusioni. . . . .	34
<b>4 Identificazione dei parametri di danneggiamento per il modello CDM.</b>	<b>39</b>

iv INDICE

4.1	Configurazione sperimentale. . . . .	40
4.2	Analisi delle immagini attraverso la Digital Image Correlation. . . . .	40
4.3	Tecnica di identificazione. Equilibrium Gap Method. . . . .	41
4.4	Identificazione dei parametri della legge di danneggiamento oppure di una legge di danneggiamento. . . . .	45
<b>5</b>	<b>Valutazioni e sviluppi futuri</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>51</b>
<b>A</b>	<b>Sub-routines di MSC Marc</b>	<b>53</b>
A.1	Implementazione del modello di danneggiamento . . . . .	53
A.1.1	Integrazione col metodo di Eulero . . . . .	54
A.1.2	Integrazione col metodo di Runge-Kutta. . . . .	58
<b>B</b>	<b>Programmi per l'identificazione dei parametri di incrudimento</b>	<b>63</b>
B.1	Metodo <i>diretto</i> . . . . .	63
B.1.1	Metodo unidimensionale. . . . .	63
B.1.2	Metodo bidimensionale. . . . .	67
B.2	Identificazione automatizzata $T_1$ . . . . .	70
B.3	Identificazione automatizzata $T_2$ . . . . .	73
	<b>Bibliografia</b>	<b>79</b>
	<b>Colophon</b>	<b>81</b>
	<b>Indice analitico</b>	<b>82</b>

# Capitolo 1

## Introduzione

Come dice il Professor J. L  maitre, “*L’endommagement, comme le diable, invisible mais redoutable*” ovvero “Il danneggiamento, come il diavolo,   invisibile ma temibile”. In questa massima   racchiuso l’approccio che il progettista meccanico e lo studioso di meccanica dei materiali ha sempre avuto, anche inconsapevolmente, con questo fenomeno cos  sfuggente alla misura ma allo stesso tempo sempre presente nella vita di tutti i materiali di uso industriale.

Sebbene non esista una definizione quantitativa unanimemente accettata del danneggiamento, tutti gli studiosi sono concordi nell’affermare che esso si manifesta attraverso la formazione in seno al continuo del materiale di una serie di discontinuit  di interfaccia per ci  che riguarda le micro-fissure, oppure di discontinuit  di volume per le micro-cavit  o micro-vuoti. Si tratta dunque di un processo *reologico* molto diverso dalla deformazione, bench  le cause iniziali dei due fenomeni siano identiche: movimenti intermolecolari nei materiali organici, micro-decoesioni nei minerali. Il danneggiamento in particolare presenta un carattere di irreversibilit  molto pronunciata: infatti persino i trattamenti termo-meccanici non fanno sparire che molto parzialmente i difetti creatisi.

La rottura macroscopica   stata studiata da molto tempo. Gi  Leonardo da Vinci nel XVI secolo si preoccupava di caratterizzare la rottura con l’aiuto di grandezze meccaniche (il carico, la sezione resistente). Seppure molti criteri di rottura siano stati proposti nel corso degli ultimi secoli (Coulomb, Rankine, Tresca, Von Mises, Mohr, Caquot...), solo di recente ci si   cominciati a preoccupare degli effetti del progressivo deterioramen-

to dei materiali che ne precede la rottura. Solamente nel 1958 Katchanov pubblicava la sua prima memoria che coniava una variabile continua di *danneggiamento* nell’ambito dell’evoluzione delle grandezze visco-plastiche dei materiali sollecitati a temperature medie e alte, gettando di fatto le basi per lo studio del danneggiamento. In seguito in diverse nazioni (Francia, Regno Unito, Svezia, Danimarca, Stati Uniti, Giappone) molti studiosi appassionati hanno continuato questo lavoro di indagine sperimentale ancor oggi in continuo sviluppo per quel che riguarda l’identificazione sperimentale dei parametri caratteristici dei materiali.

Tuttavia oggi solo alcuni modelli di danneggiamento hanno raggiunto un grado di completezza tale da poter essere proposti per la previsione delle condizioni di esercizio di opere ingegneristiche destinate alla produzione industriale. Nondimeno rimane ancora un vuoto da colmare per poter ritenere i modelli di danneggiamento affidabili. Difatti, come per molti altri modelli, una delle maggiori difficoltà riguarda l’identificazione dei parametri caratteristici, ovvero di quelle grandezze numeriche che, caratterizzando un materiale o un processo, servono a rendere affidabili le previsioni di comportamento fornite dai modelli stessi.

Tenendo presenti le premesse fatte, nel presente lavoro ci si propone di scegliere un modello di danneggiamento (tra quelli riconosciuti validi dalla comunità scientifica), di implementarlo in un *software* commerciale di calcolo agli elementi finiti, già ampiamente utilizzato e ritenuto affidabile da una vasta comunità di progettisti e dall’industria (MSC Marc per motivi di *partnership*), e di delineare una tecnica sperimentale di identificazione dei parametri del modello.

Il problema industriale a cui si vuol iniziare a dare una risposta finalmente è quello di prevedere l’affidabilità in esercizio di materiali i quali durante la lavorazione e la messa in opera sono stati sottoposti ad una serie di grandi deformazioni plastiche. In particolare ci si vuole occupare di tubi in acciaio da impiegare nella costruzione di gasdotti ed oleodotti. Infatti la tecnica costruttiva di queste opere prevede una serie di grandi deformazioni a cui sottoporre i tubi durante il loro collegamento (per formare le cosiddette *pipes*) ed infine, in particolar modo, durante la loro messa in opera. Specialmente la tecnica cosiddetta del *reeling* per la posa di tubazioni sottomarine (*off-shore*) sottopone i materiali a un numero di grandi deformazioni plastiche.

Pertanto nel lavoro che segue, vengono presentati i seguenti argomenti, come brevemente descritto in riferimento a ciascun capitolo.

1.0

3

Capitolo ?? (*I modelli di danneggiamento*). In questo capitolo vengono presentati i modelli di danneggiamento presi in considerazione per condurre il lavoro presentato in questa tesi.

Capitolo ?? (*Implementazione agli elementi finiti del modello CDM*). In questo capitolo si parla di come è stato numericamente implementato il modello da noi scelto e si presentano i risultati ottenuti, modellando dei casi sperimentalmente noti.

Capitolo ?? (*Identificazione della legge di incrudimento*). Qua si parla di una serie di approcci seguiti per identificare la legge di incrudimento per i materiali considerati.

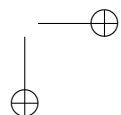
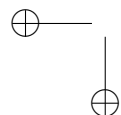
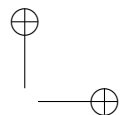
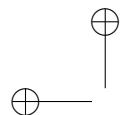
Capitolo ?? (*Identificazione dei parametri di danneggiamento per il modello CDM*). Si spiega come sono stati identificati i parametri di danneggiamento e quali sono i limiti attuali nell’identificazione di questi parametri.

Capitolo ?? (*Valutazioni e sviluppi futuri*) Si mettono in evidenza i punti rilevanti e gli argomenti su cui focalizzare l’attenzione, scaturiti dal presente lavoro.

Capitolo ?? (*Conclusioni*) Si traggono le conclusioni.

Capitolo ?? (*Sub-routines di MSC Marc*) Son presenti i listati delle routine scritte in Marc ed usate per condurre il lavoro.

Capitolo ?? (*Programmi per l’identificazione dei parametri di incrudimento*)



## Capitolo 2

# Implementazione agli elementi finiti del modello CDM.

In questo capitolo si parla dell’implementazione numerica del modello di danneggiamento CDM nella versione proposta da Bonora. Si presentano inoltre delle simulazioni fatte con geometrie note, rimandando alle appendici per la parte che descrive il codice scritto.

## 2.1 Implementazione del modello continuous damage mechanics.

Il modello proposto da Bonora non è presente nella versione commerciale di MSC Marc.

Data la possibilità di scrivere dei sottoprogrammi specifici (le cosiddette *user-subroutines*) e la possibilità di utilizzare un coefficiente à la Katchanov [Kat57] con cui far automaticamente aggiornare passo-passo i valori della  $\sigma_y$  e del modulo di Young  $E$  si è proceduto ad implementare la funzione di danneggiamento  $D$  all’interno di una sub-routine scritta in linguaggio ForTran.

Per eseguire correttamente i calcoli per ciascun elemento della *mesh*, relativa al modello considerato, la routine ottiene dal programma principale il valore delle grandezze che caratterizzano durante ciascun passo temporale il suo stato di tensione e di deformazione ( $\sigma_H, \sigma_{eq}, \varepsilon_p, \varepsilon_e$ ). Invece i parametri di danneggiamento, caratteristici del materiale ( $D_0, D_{cr}, \alpha, \varepsilon_f, \varepsilon_{th}, \nu$ )

## 6 IMPLEMENTAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI DEL MODELLO CDM. 2.2

vengono introdotti nella sub-routine tramite la lettura da un file esterno, a causa di un problema nell’attuale versione del Marc che rende i parametri di danneggiamento inaccessibili alla *sub-routine*.

La funzione differenziale  $dD = f(p, dp, D, \sigma_H/\sigma_{eq}; D_0, D_{cr}, \alpha, \varepsilon_f, \varepsilon_{th}, \nu)$ , che descrive l’evoluzione del danneggiamento, è integrata tramite il metodo di Runge-Kutta, qualora si abbia un passo temporale d’integrazione costante. Invece si preferisce il metodo di integrazione numerica di Eulero se il passo temporale di integrazione è variabile o adattativo. Una descrizione dettagliata del codice è riportata in Appendice A.

Il codice scritto è stato utilizzato per modellare il comportamento di alcuni provini proporzionali lisci a sezione circolare e a sezione circolare con intaglio (RNB). Inoltre è stata modellata sia l’applicazione di un carico monotono che di un carico periodico da zero a valori via via crescenti ogni ciclo.

### 2.2 Modellazione numerica di alcune geometrie.

Sono state modellate numericamente alcune geometrie di cui si conosce anche il comportamento reale poiché abbiamo condotto delle prove sperimentali su provini di geometria uguale.

I parametri costitutivi dei materiali, adoperati per la modellazione FEM, sono stati identificati tramite le prove sperimentali mentre le condizioni di carico usate (intensità ed evoluzione temporale), sono le stesse applicate sperimentalmente sui saggi di prova.

#### 2.2.1 Provino liscio intagliato a sezione cilindrica. Round notched bar.

Si consideri il provino cilindrico indexprovino !cilindrico intagliato di geometria indicata in Fig. 2.1. Questo tipo di geometria consente di concentrare gli sforzi nella zona intagliata, di produrre stati tensionali a forte triassialità e, di conseguenza, di localizzare in modo preciso il necking.

In Fig. ?? è mostrata la mappa del danneggiamento durante una delle ultime fasi della plasticizzazione ottenuta in condizioni di carico a rampe di valore massimo sempre crescente, come illustrato in Fig. 2.3.

#### 2.2.2 Provino piatto a sezione rettangolare.

Si considera ora un’altra tipologia di provino, da noi adottata principalmente per soddisfare alcune esigenze sperimentali. Infatti per poter appli-



## 2.2 MODELLAZIONE NUMERICA DI ALCUNE GEOMETRIE. 7

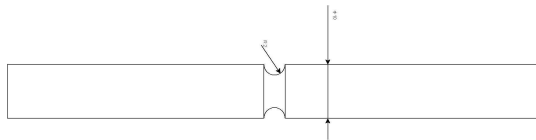


Figura 2.1: *Geometria dei provini Round Notched Bar (RNB) usati durante per la simulazione numerica.*

care agevolmente la tecnica della correlazione digitale è necessario acquisire immagini relative a superfici piane per poterne seguire gli spostamenti nel piano. Inoltre, volendo usare anche la tecnica estensimetrica, può facilmente essere sfruttata la faccia opposta a quella su cui si pratica la correlazione digitale, per incollarvi gli estensimetri.

La geometria del provino considerato è rappresentata in Fig. La zona a sezione costante in mezzeria è raccordata molto dolcemente con la zona dell'afferraggio per favorire gli stati di tensione.

Nelle simulazioni considerate il carico viene applicato in modo monotono ma vengono usate due varianti della routine. Una con la correzione del coefficiente à la Katchanov e una senza. La correzione serve per evitare che il moltiplicatore  $(1 - D)$  venga usato due volte e quindi il valore delle grandezze moltiplicate (il modulo elastico  $E$  in particolare) sia moltiplicato per  $(1 - D)^2$ . Tuttavia vengono presentati anche i risultati ottenuti con la routine sbagliata per evidenziare numericamente quale errore si commette sia in termini della stima del danno accumulato che della distribuzione delle tensioni (anche in termini della triassialità). Per ulteriori dettagli sul funzionamento delle routines considerate si rimanda all'Appendice A.

In Fig. 2.4 è illustrato il danneggiamento nella fase finale della prova, al momento della propagazione della cricca, avendo utilizzato la routine senza correzione.

In Figg. 2.5 e 2.6 si vede invece la variabile triassialità ( $T = \sigma_H / \sigma_{eq}$ ) in due momenti diversi della prova, una durante la plasticizzazione e l'altra durante il collasso del provino.

Nelle Figg. 2.7, 2.8 e 2.9 vengono mostrate le grandezze analoghe a quelle descritte precedentemente ma con l'uso della routine *esatta* ovvero quella che corregge il coefficiente di Katchanov.

Come si può vedere, nonostante la tendenza macroscopica delle grandezze considerate nei due casi precedenti sia simile, nei particolari ci sono

## 8 IMPLEMENTAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI DEL MODELLO CDM. 2.2

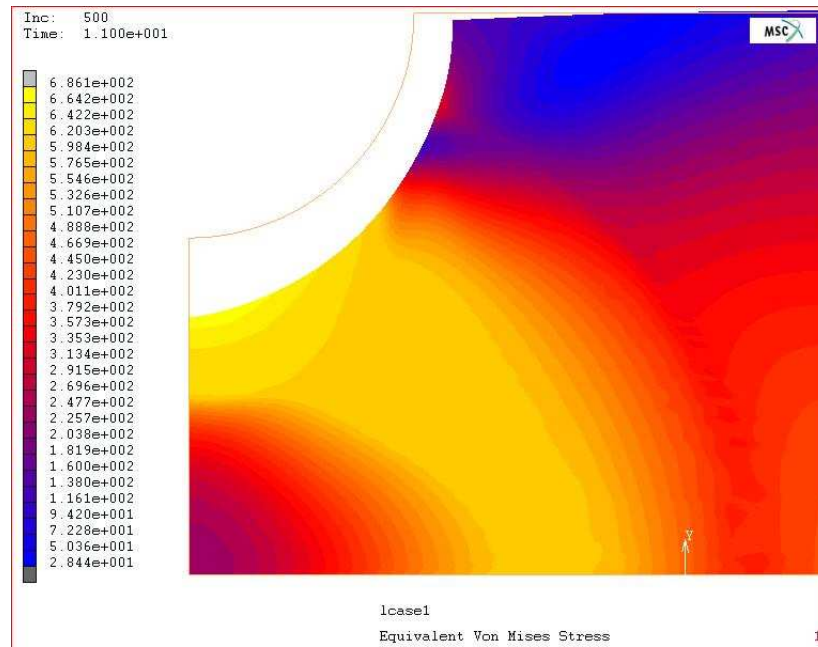


Figura 2.2: *Tensione equivalente di Von Mises nel provino RNB durante una delle ultime fasi prima della rottura.*

delle differenze che, considerando delle geometrie e delle storie di carico diverse e più complesse, potrebbero diventare molto diverse.

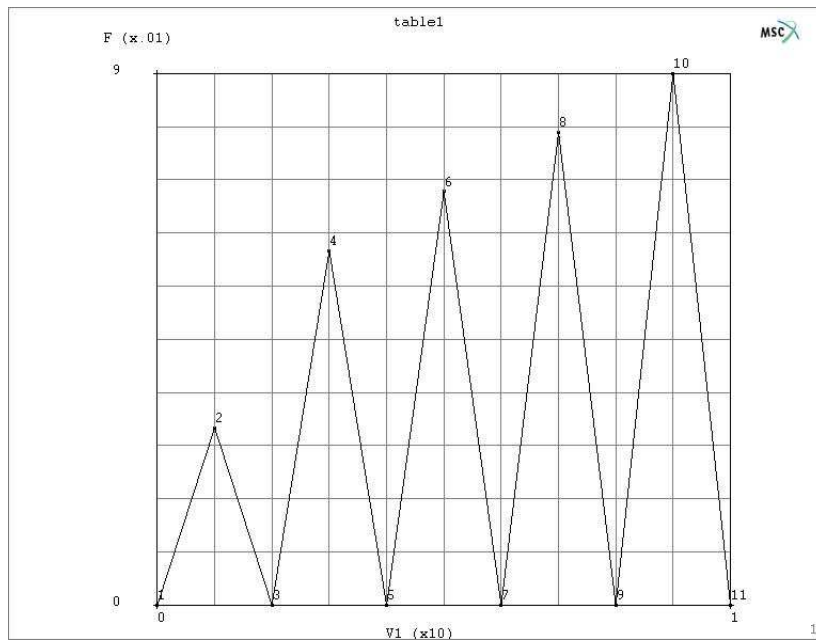


Figura 2.3: *Storia di carico usata per modellare la prova sul provino RNB.*

## 10 IMPLEMENTAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI DEL MODELLO CDM.2.2

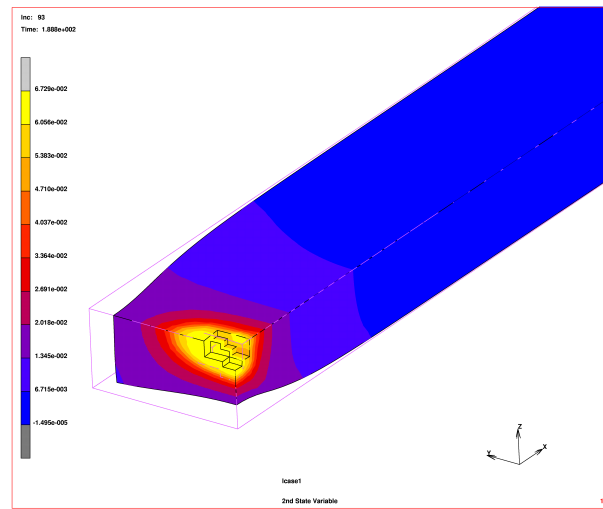


Figura 2.4: *Danneggiamento nella sezione del provino piatto, senza la correzione sul moltiplicatore di Katchanov.*

2.2 MODELLAZIONE NUMERICA DI ALCUNE GEOMETRIE. 11

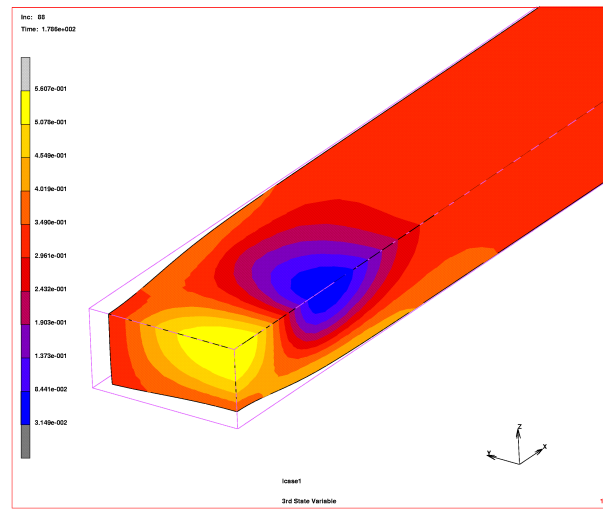


Figura 2.5: *Triassialità nella sezione del provino prima della rottura, senza la correzione del moltiplicatore di Katchanov.*

## 12 IMPLEMENTAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI DEL MODELLO CDM.2.2

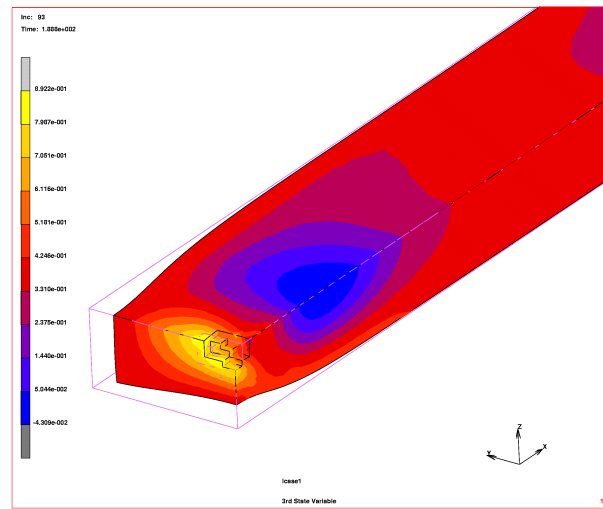


Figura 2.6: *Triassialità nella fase di rottura, senza la correzione del moltiplicatore di Katchanov.*

## 2.2 MODELLAZIONE NUMERICA DI ALCUNE GEOMETRIE. 13

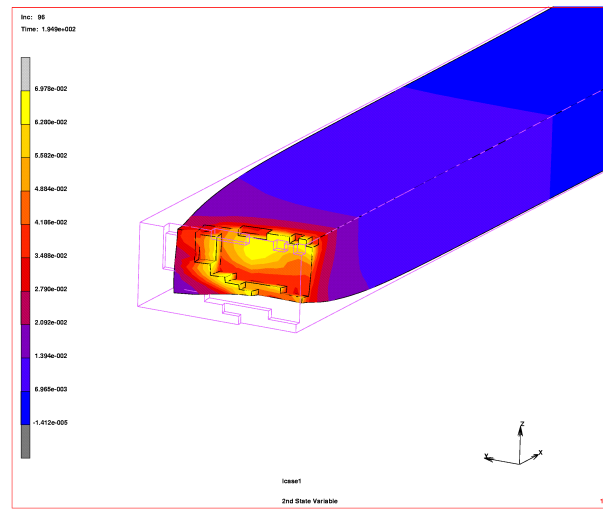


Figura 2.7: *Danneggiamento nella sezione del provino piatto, con la correzione sul moltiplicatore di Katchanov.*

14 IMPLEMENTAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI DEL MODELLO CDM.2.2

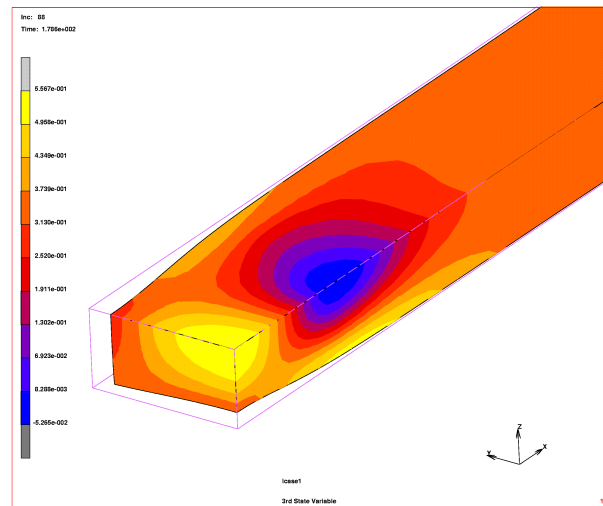


Figura 2.8: *Triassialità nella sezione del provino prima della rottura, con la correzione del moltiplicatore di Katchanov.*



2.2 MODELLAZIONE NUMERICA DI ALCUNE GEOMETRIE. 15

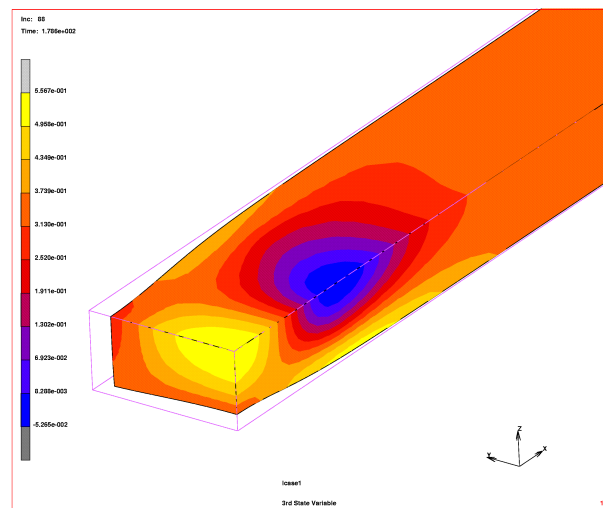
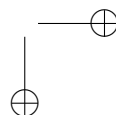
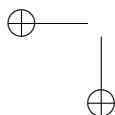
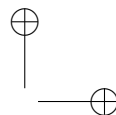
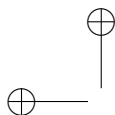


Figura 2.9: *Triassialità nella fase di rottura, con la correzione del moltiplicatore di Katchanov.*



## Capitolo 3

# Identificazione della legge di incrudimento.

In generale una buona identificazione della legge di incrudimento di un materiale permette di prevederne in modo significativamente affidabile il comportamento in campo non lineare, tanto più quando le geometrie e gli stati di tensione che si vogliono esaminare sono complessi e le dimensioni e i carichi del modello rendono particolarmente costosa o addirittura irrealizzabile una prova in scala reale.

In particolare è necessario disporre di una buona identificazione del comportamento true strain-true stress perché il modello di danneggiamento CDM, nella versione proposta da Bonora, possa funzionare correttamente. Infatti questo modello di danneggiamento tratta in modo analiticamente indipendente il danneggiamento e l'incrudimento, nonostante i due fenomeni siano intimamente connessi. Se per un verso, come detto altrove, questo aspetto implica una maggiore attenzione in fase di implementazione numerica del modello, dall'altro offre il grande vantaggio di permettere una più agevole identificazione sperimentale dei parametri legati a questi due aspetti.

Di seguito viene presentato il metodo da noi proposto per identificare una legge di incrudimento, utilizzando le misure full field di spostamenti e deformazioni scaturite dalla correlazione digitale di immagini. Vengono mostrati due metodi diretti, che non fanno uso di modellazioni FEM, e due metodi che utilizzano anche la modellazione agli elementi finiti per trovare i parametri di una legge di incrudimento, confrontando sempre i risultati

numerici con quelli sperimentali.

In questo caso abbiamo identificato i parametri della legge di Ramberg-Osgood ma il metodo proposto può essere usato per identificare i parametri di una legge qualunque.

### 3.1 Metodo della stima locale tramite DIC.

In questa fase dell’analisi dei dati sperimentali si tenta di ottenere una misura locale degli sforzi e delle deformazioni, quanto più possibile diretta, cioè assumendo il minor numero possibile di ipotesi sulla distribuzione dei carichi interni e sulla natura della legge di incrudimento.

Si cerca di sfruttare la ricca base di informazioni fornita dalle misure a campo intero, ottenute con la correlazione digitale di immagini, utilizzando il maggior numero di informazioni possibili, con l’intento di ridurre sia la dispersione dei dati, intrinseca alla tecnica, sia gli errori dovuti alle semplificazioni ed alle poche inevitabili ipotesi assunte per condurre l’analisi.

#### 3.1.1 Modello 1D.

Con questo semplice modello unidimensionale si cerca di avere una misura degli sforzi e delle relative deformazioni (per porzioni di provino che costituiscono delle strisce normali alla direzione di applicazione del carico) partendo dalle misure a campo intero fatte con la DIC su una zona ZOI (Zone of Interest) che ragionevolmente include sia la zona che va incontro a strizione durante lo svolgimento della prova che porzioni di materiale poco o per nulla plasticizzate. Se si esegue l’analisi DIC usando un algoritmo che si basa sul principio degli elementi finiti [3], dividendo l’area di interesse in elementi allineati secondo la direzione parallela (che chiameremo  $y$ ) e normale a quella di applicazione del carico (direzione  $x$ ), si possono considerare gli elementi aventi la stessa coordinata  $y$ , come costituenti una striscia e di conseguenza il provino in 3D può essere visto come la sovrapposizione di fette di larghezza e profondità uguali a quelle del provino ed altezza uguale a quella degli elementi considerati nella correlazione digitale, come illustrato in Fig. 3.1.

Dalla correlazione digitale di immagini si possono avere le misure a campo intero degli spostamenti e delle deformazioni sul piano relative agli elementi ed ai nodi della mesh in cui è stata divisa la zona di interesse. Considerando per ciascuna striscia il valor medio della deformazione  $\epsilon_{yy}$ , questo

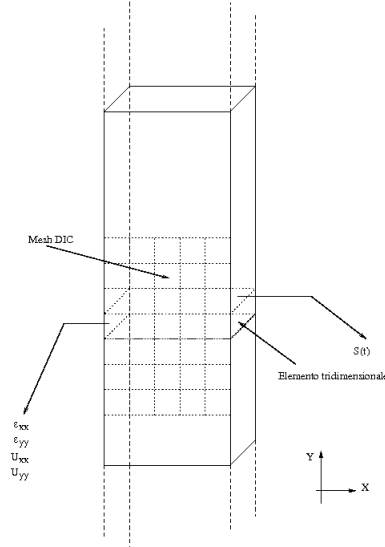


Figura 3.1: Schematizzazione seguita per il modello 1D. Gli elementi fetta hanno la stessa larghezza e profondità del provino in esame.

può essere assunto come valore della deformazione per l'identificazione della legge di incrudimento.

In modo diverso si può invece stimare il valore dello sforzo  $\sigma$  agente in ogni fetta in cui è stato diviso il provino. Il valore del carico  $F(t)$  agente al tempo  $t$  (noto sperimentalmente dalle misure effettuate dalla cella di carico della macchina servoidraulica di prova) è ovviamente uguale per ogni *elemento-fetta*, dato che queste possono essere immaginate come degli elementi posti in serie. Il valore dell'area della sezione resistente  $S_i(t)$  relativo all'elemento  $i$  invece viene dedotto dal valore degli spostamenti in direzione  $x$  facendo le ipotesi di deformazione plastica isocora e di addittività della deformazione totale, cioè  $\epsilon_{TOT} = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl}$ , dove  $\epsilon_{TOT}$  è la deformazione totale,  $\epsilon_{el}$  la deformazione elastica ed  $\epsilon_{pl}$  la deformazione plastica.

Possono in questa maniera essere costruite tante curve *true stress-true strain* quante sono le fette considerate, essendo  $F_i(t) = F(t)/S_i(t)$ . In Fig. 3.2 viene illustrata la mesh iniziale in condizioni di assenza di carico all'istante  $t_0$ , mentre in Fig. 3.3 si può vedere la configurazione deformata col campo di spostamenti in colore in direzione  $x$  dopo la localizzazione ed in presenza di forte strizione. Per ciascuna striscia, di cui è indicato il

numero a lato, si possono vedere le relative curve in Fig. 3.4. Come si può notare, le curve sono tra loro decisamente diverse. Infatti quelle relative alle strisce interessate da forte strizione presentano incrudimento ma nessun effetto di *softening*, al contrario di quello che accade alle curve relative a zone interessate da plasticizzazione ma in misura nettamente minore, zone tanto più lontane dalla zona di *necking* quanto maggiore è la strizione.

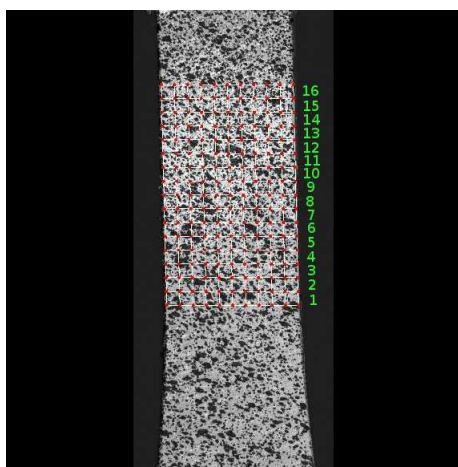


Figura 3.2: *Mesh utilizzata dal software di correlazione digitale di immagini per l'analisi. Il numero a lato indica il numero della striscia considerato nell'analisi col modello 1D.*

Questo interessante fenomeno merita una riflessione. Facendo l'ipotesi che il materiale sia isotropo, ci si dovrebbe aspettare la stessa curva true stress-true strain per qualunque porzione dello stesso materiale. L'evidente disomogeneità dei risultati ottenuti si spiega invece con l'effetto dell'omogeneizzazione del comportamento del materiale (che lungo ciascuna striscia evidentemente è molto diverso), ottenuta con questo modello unidimensionale. Infatti lungo ciascuna striscia alcune zone sono state fortemente plasticizzate nel momento in cui altre sono addirittura ancora in campo elastico (vedi Fig. 3.5). Inoltre, essendo stata condotta la prova in controllo di spostamento, il valore totale della forza applicata è prima crescente, poi decrescente. L'evoluzione concorrente di questi due fenomeni porta ad avere il fenomeno del *softening*, secondo gli usuali sistemi di correzione, fenomeno che, a nostro avviso, nella realtà (almeno per ciò che riguarda questo materiale), ovvero a livello locale, non esiste.

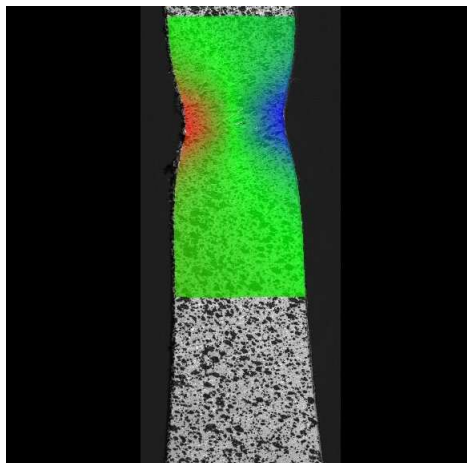


Figura 3.3: *Campo di spostamenti in direzione orizzontale dopo il necking e prima della rottura del provino*

Figura 3.4: *Curve true stress-strain relative alle strisce in cui è stata divisa la zona di interesse con la DIC.*

Al fine di giustificare sperimentalmente le affermazioni appena fatte, si considerino le figure che seguono. Nelle Figg. 3.5 e 3.6 sono rappresentati i valori delle deformazioni in direzione parallela e trasversale a quella di applicazione del carico per ciascun elemento-fetta. Ciascuna delle linee unisce i punti sperimentali relativi allo stesso istante. Si nota che i valori della deformazione sono via via crescenti in valore assoluto al crescere del carico applicato (e quindi del tempo) ma presentano valori tanto più grandi, quanto più ci si avvicina alla zona strizionata.

Tuttavia le informazioni più interessanti si possono vedere in Figg. 3.8 e 3.9. In particolare in Fig. 3.8 è mostrato l'andamento della tensione lungo gli elementi-fetta in funzione del tempo. Si vede chiaramente che negli elementi lontani dalla zona strizionata addirittura la tensione inizia a decrescere allorché la macchina di prova inizia a far diminuire il carico applicato mentre, al contrario, nella zona in cui è avvenuta la localizzazione (necking) la tensione cresce inesorabilmente, nonostante la diminuzione del carico, in ragione della forte diminuzione di sezione. Per una migliore

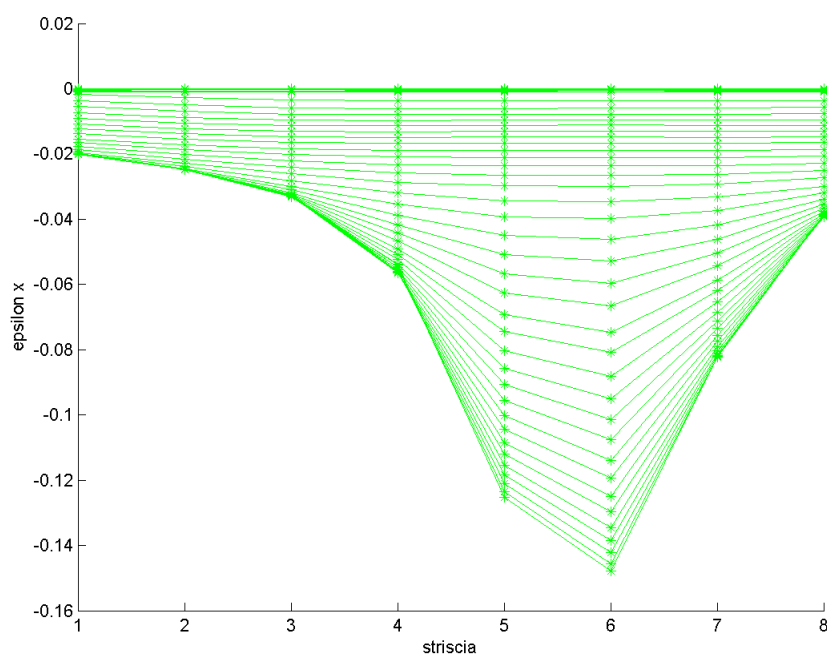


Figura 3.5: *Andamento della deformazione in direzione assiale valutato in ciascun elemento fetta.*

comprensione del fenomeno, si osservi anche la figura 3.9, che mostra le curve true stress-true strain per ciascun elemento.

### 3.1.2 Modello 2D.

In modo analogo l'analisi condotta in maniera semplificata col modello unidimensionale può essere estesa al caso di un modello a due dimensioni. Si immagini di avere degli elementi parallelepipedi di cui una faccia corrisponde ad un elemento della mesh usato per condurre l'analisi DIC (vedi Fig. 3.14). Le ipotesi sull'addittività della deformazione e sulla plasticizzazione isocora sono le medesime fatte in precedenza. Per costruire le curve true stress-true strain relative a ciascuno degli elementi parallelepipedi, si considerano i valori della deformazione in direzione  $y$  ottenuti dalla correlazione digitale.



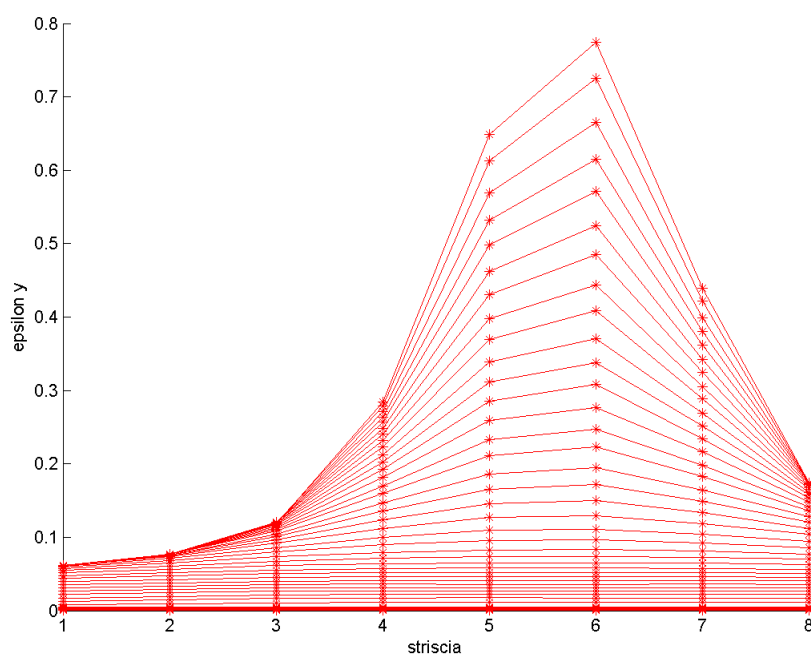


Figura 3.6: *Andamento della deformazione in direzione trasversale valutato in ciascun elemento fetta.*

Il valore degli sforzi viene invece calcolato in base alla stima dell'area resistente di ciascun elemento, utilizzando le informazioni degli spostamenti fornite dalla DIC e facendo l'ipotesi di deformazione plastica isocora. Il valore del carico agente su ciascuno degli elementi tridimensionali viene calcolato come il valore agente sulla porzione di sezione considerata, secondo una distribuzione parabolica del carico il cui andamento viene stimato facendo una ottimizzazione tramite un algoritmo che minimizza una funzione obiettivo, la quale rappresenta la differenza tra il campo di spostamenti sperimentali e quelli calcolati da un software agli elementi finiti.

Figura 3.7: .

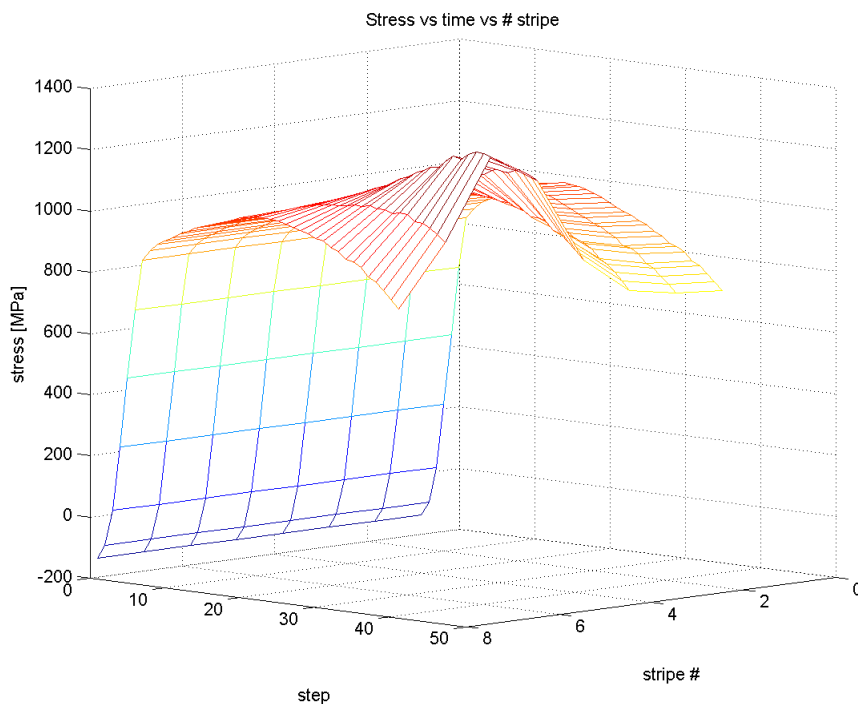


Figura 3.8: *Andamento della tensione in funzione del passo temporale considerato(step) per dellafetta(stripe).*

In Fig. 3.15 si può vedere l’andamento delle curve relative ad alcuni degli elementi considerati in un’analisi DIC, condotta dividendo la zona di interesse in 40 elementi (5/*times*8). Inoltre è stata condotta un’analisi comparativa per valutare l’effetto della taglia della mesh sul risultato finale. In Fig. ?? si possono vedere le curve ottenute con mesh i cui elementi hanno dimensione  $30 \times 30$  pixel/elemento. Si può notare, facendo un confronto con le curve di Fig. 3.4, relative a una mesh usata nella DIC di  $60 \times 60$  pixel/elemento, che la localizzazione dell’analisi porta ad apprezzare meglio il comportamento effettivo del materiale alla scala considerata. Infatti se da un lato la DIC fornisce dei dati più rumorosi al diminuire della dimensione degli elementi, le deformazioni e gli sforzi che si ottengono nelle curve true stress-true strain sono via via più grandi.

In termini comparativi si può osservare che i due metodi proposti si-

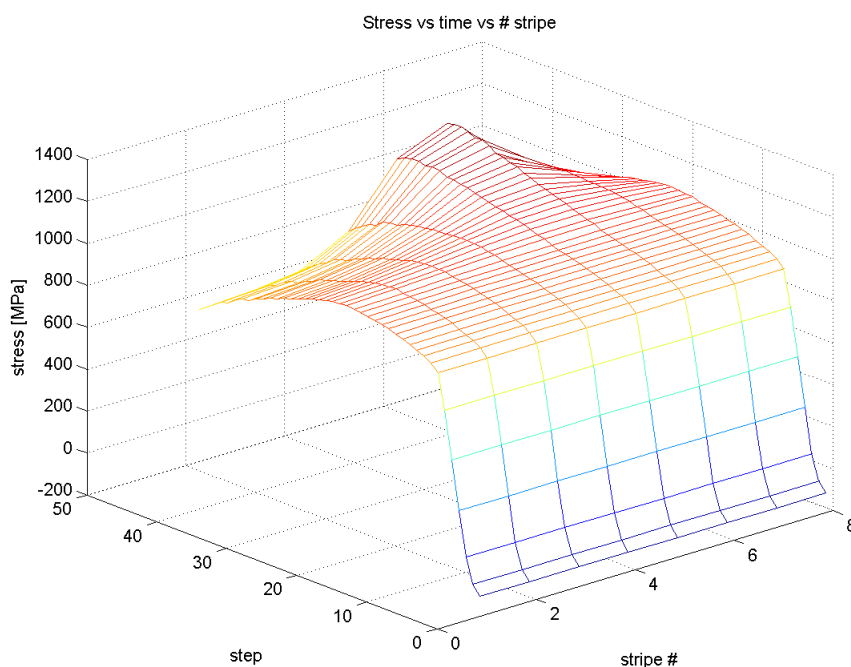


Figura 3.9: *Andamento della tensione in funzione del passo temporale considerato(step) per della fetta(stripe).*

nora evidenziano delle deformazioni di un ordine di grandezza più grande rispetto a quelle che si otterrebbero con i metodi di correzione tradizionali, con valori più o meno grandi in funzione della dimensione degli elementi della mesh usata per condurre l’analisi con la correlazione digitale.

## 3.2 Identificazione automatizzata.

Una volta ottenute le curve nelle due modalità descritte, si possono usare le leggi di incrudimento identificate per avviare un metodo di ricerca automatizzata più sofisticato. Infatti, disponendo dei dati sperimentali relativi al campo di spostamenti e deformazioni nel piano nella zona di interesse, del carico applicato durante la prova in funzione del tempo e della geometria del provino, si può mettere a punto un algoritmo di identificazione che

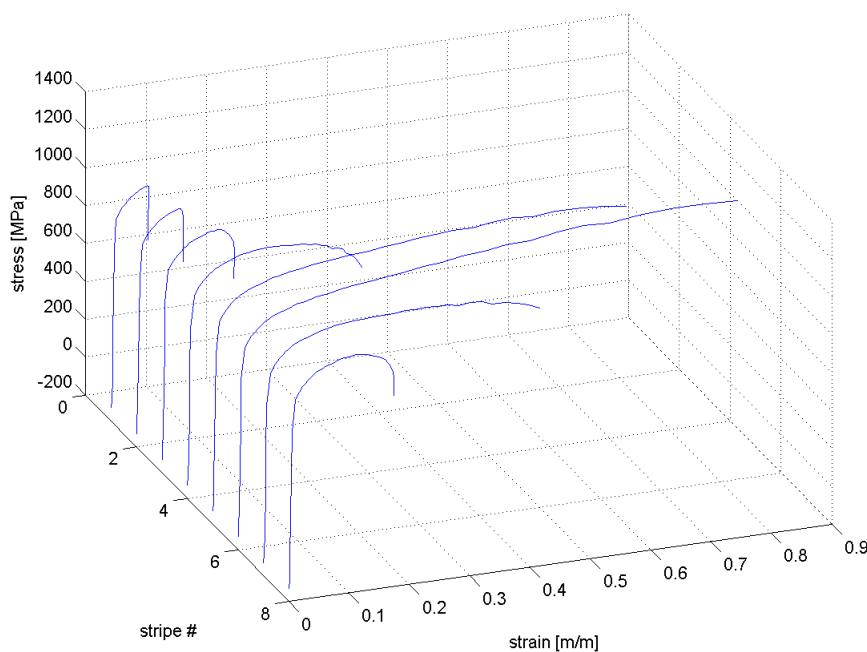


Figura 3.10: *Andamento della tensione in funzione della deformazione e della fetta(stripe) considerata.*

effettua un confronto fra dati sperimentali e dati numerici calcolati da un codice agli elementi finiti che usi i parametri da identificare per descrivere la legge costitutiva del materiale. L'algoritmo in maniera automatica minimizza la differenza fra dati sperimentali e dati calcolati, intervenendo sui parametri della legge costitutiva sino a convergenza.

Data la presunta isotropia del materiale considerato, la natura della prova considerata e la modalità di ricerca del minimo che si vuole effettuare, si è scelta come legge costitutiva quella di Ramberg-Osgood:

$$\sigma_s = \sigma_Y + K_Y p^{1/M_Y} \quad (3.1)$$

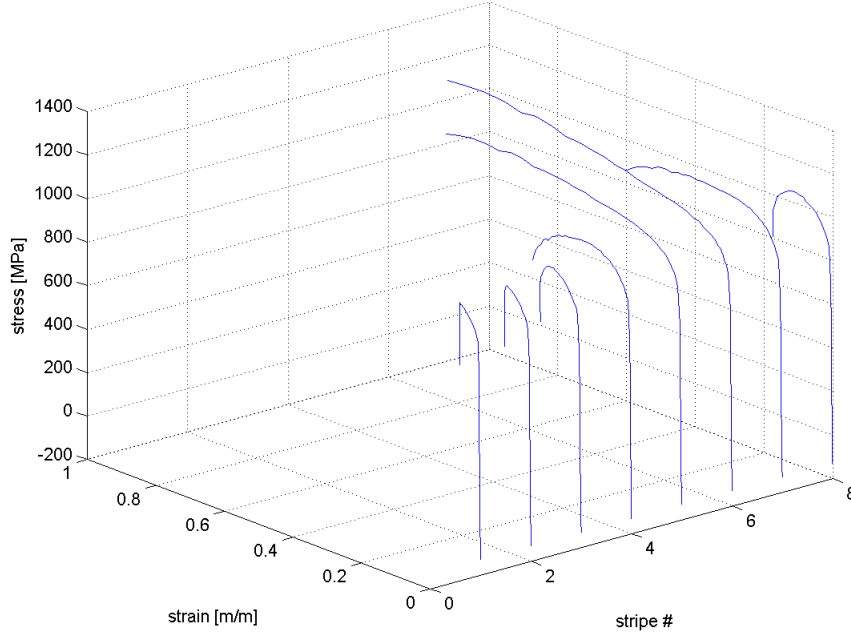


Figura 3.11: *Andamento della tensione in funzione della deformazione e della fetta(stripe) considerata.*

dove  $\sigma_Y, K_Y, M_Y$  sono i parametri della legge ed  $\varepsilon_p$  la deformazione plastica, nonché variabile indipendente, e  $\sigma_s$  la tensione. Il problema viene affrontato in maniera duale. Infatti in uno dei due approcci seguiti ( $T_1$ ) si considerano come condizioni al contorno della simulazione numerica le forze imposte dagli afferraggi al provino nel corso della prova (quindi in funzione del tempo) e si minimizza una funzione sommatoria della norma euclidea delle differenze quadratiche fra campo di spostamenti calcolati e quelli sperimentali direttamente calcolati tramite DIC nella zona di interesse.

Invece nell’approccio duale ( $T_2$ ) si considerano come condizioni al contorno gli spostamenti imposti dalla macchina di prova in funzione del tempo

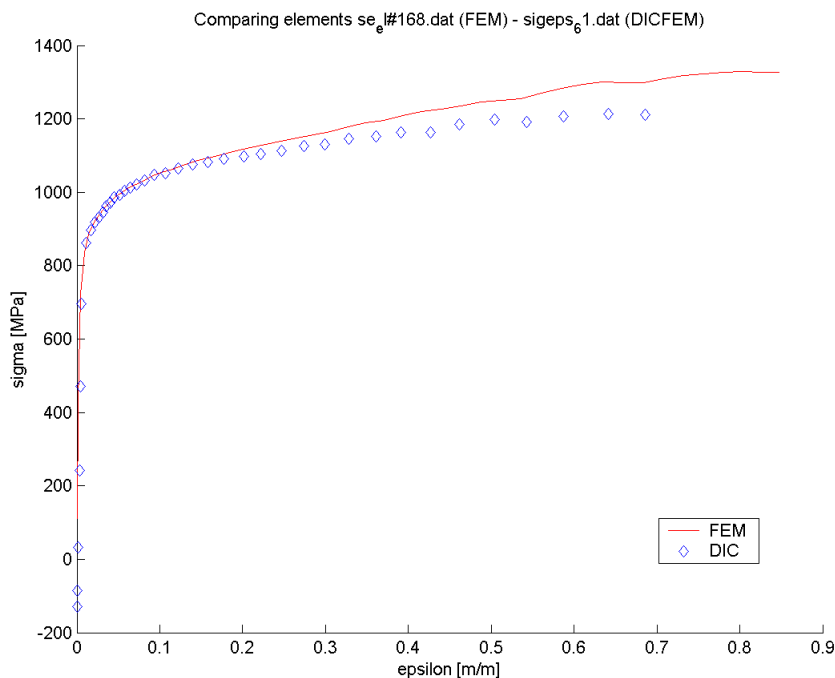


Figura 3.12: Confronto tra la curva ottenuta sperimentalmente col metodo DIC e quella ottenuta con l'analisi FEM per un elemento posto all'estremità della zona strizionata.

e si impone inoltre ai nodi della superficie della zona di interesse lo stesso campo di spostamenti sperimentali nel piano, come risulta dall'analisi DIC. In questo modo, data la condizione  $\text{div}(\sigma) = 0$  sulle facce esterne del provino (condizione di superficie libera), la funzione obiettivo da minimizzare contiene le reazioni ai nodi della superficie su cui sono stati applicati gli spostamenti sperimentali nella ZOI (zone of interest).

### 3.2.1 Metodo $T_1$ . Minimizzazione delle differenze dal campo di spostamenti sperimentali.

Nel primo approccio seguito, un algoritmo di ricerca dei parametri della legge di Ramberg-Osgood (sotto la forma di parametri  $\alpha$ ) fa eseguire iterativamente (sino alla convergenza della funzione obiettivo  $T_1$ ) un'analisi

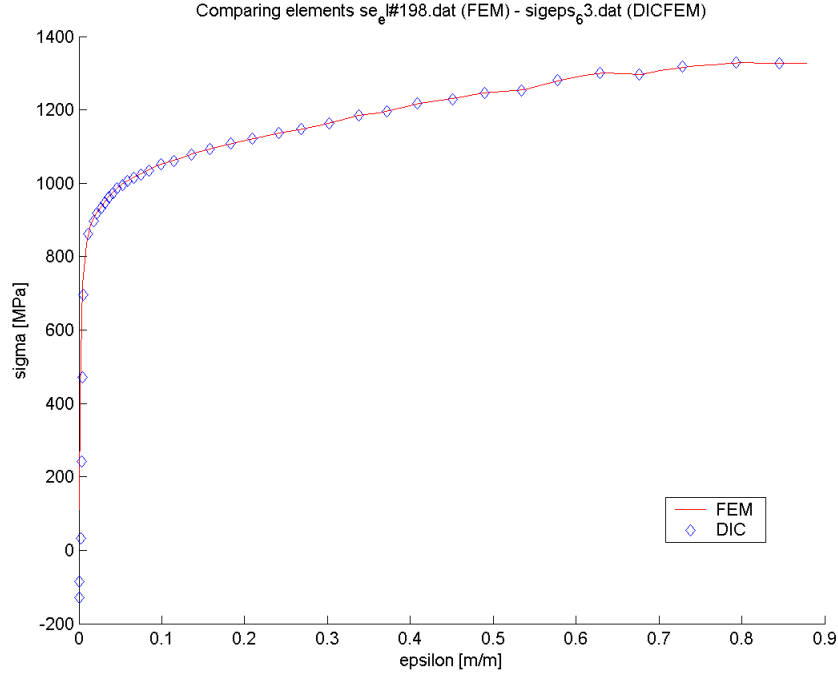


Figura 3.13: Confronto tra la curva ottenuta sperimentalmente col metodo DIC e quella ottenuta con l’analisi FEM per un elemento posto nella mezzeria della zona strizionata.

agli elementi finiti della prova sperimentale, fornendo al codice FE una legge costitutiva del materiale costruita secondo i valori dei parametri  $\alpha$  considerati. La funzione obiettivo vale:

$$T_1(t; \alpha) = \iint_D \left\| U_{exp}(x, t) - U_{calc}(x, t; \alpha) - U_0(\alpha) \right\|^2 dx \quad (3.2)$$

Dove  $U_{exp}(x, t)$  è il campo di spostamenti nel piano nella ZOI (identificata nell’integrale dell’Eq. 3.2 col dominio  $D$ ) misurato tramite la correla-

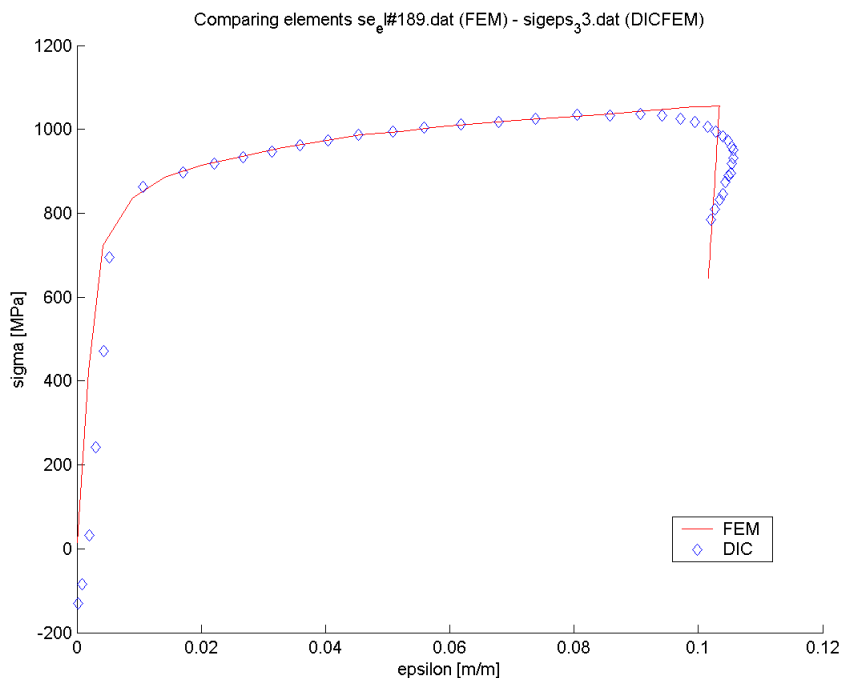


Figura 3.14: Confronto tra la curva ottenuta sperimentalmente col metodo DIC e quella ottenuta con l'analisi FEM per un elemento posto nella mezzeria a notevole distanza dalla zona strizionata.

zione digitale,  $U_{calc}(x, t; \alpha)$ ) è il campo di spostamenti nel piano calcolato dal codice di calcolo agli elementi finiti ed  $U_0(\alpha)$  è uno spostamento rigido del corpo (rototraslazione) che viene calcolato dopo l'ottimizzazione.

Le condizioni al contorno sono le forze applicate dalla macchina di prova in funzione del tempo  $t$ , come rilevato sperimentalmente. La ricerca dei parametri viene eseguita con l'algoritmo del *down hill* (detto anche del *simplexso* o dell' *amæba*), ritenuto il più adatto per queste condizioni, dato che si vuole condurre l'ottimizzazione senza far uso delle derivate né di vincoli sulle variabili (i parametri di Ramberg-Osgood nella fattispecie).

In Fig. 3.15 si può vedere la curva ottenuta dopo l'analisi compiuta seguendo questo approccio.



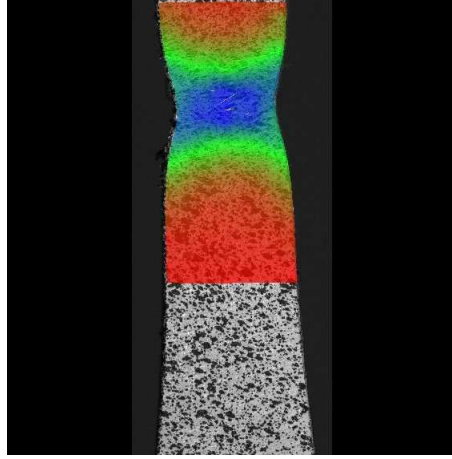


Figura 3.15: *Campo di deformazioni in direzione y (verticale). Si può notare il forte gradiente in direzione x ed y.*

### 3.2.2 Metodo $T_2$ . Minimizzazione delle reazioni nodali, imposto il campo di spostamenti sperimentali.

Questo approccio invece è il duale del precedente perché si sono imposti come condizioni al contorno sia gli spostamenti degli afferraggi in funzione del tempo che il campo di spostamenti nodali nella zona di interesse come ottenuto dall'analisi DIC. La funzione obiettivo da minimizzare invece ha la forma:

$$T_2(t; \alpha) = \iint_D \left\| f_i(t; \alpha) \right\|^2 dx \quad (3.3)$$

dove  $f_i(t; \alpha)$  sono le reazioni ai nodi  $i$  della ZOI ( $D$ ). Imponendo il campo di spostamenti ricavati sperimentalmente, all'ottimo le reazioni ai nodi devono essere minime, vale a dire che i nodi in esame devono seguire la loro spinta più possibile gli spostamenti sperimentali. In Fig. 3.16 si può vedere l'andamento della curva true stress-true strain (in blu) ottenuta utilizzando quest'ultimo algoritmo.

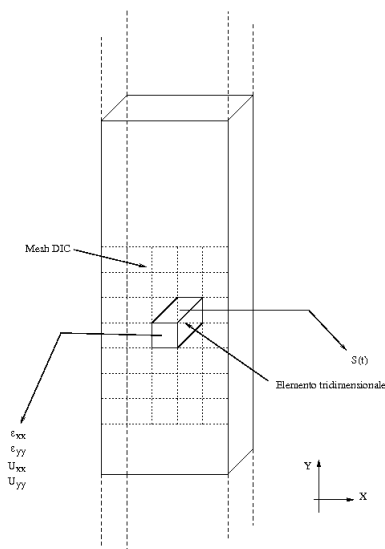


Figura 3.16: Schematizzazione seguita per costruire il modello 2D. Ogni elemento tridimensionale ha una faccia coincidente con un elemento della mesh DIC.

### 3.3 Confronto dei risultati.

Il primo metodo presentato, necessario a determinare una serie di parametri quasi-ottimi per inizializzare successivamente il metodo dell'amœba, permette di identificare una legge del comportamento plastico che, utilizzata *tout court* come legge costitutiva in un codice agli elementi finiti, porta già a modellazioni soddisfacenti ed affidabili. Si consideri infatti (Fig. 3.13) il confronto tra la legge costitutiva, identificata con questo primo metodo (e colorata in blu nella figura), e la relativa curva sforzi-deformazioni (in rosso nella figura) ottenuta con la modellazione agli elementi finiti della medesima prova di trazione da cui si sono ricavati i dati sperimentali, per la quale è stata usata come modello costitutivo del materiale proprio la curva identificata. È il caso di sottolineare che la curva ottenuta dalla modellazione numerica è relativa alle condizioni più critiche, ovvero per un elemento della zona strizionata, posto all'estremità della sezione, ovvero dove è presente la massima triassialità degli sforzi ed il massimo gradiente delle deformazioni.

Per ciò che riguarda i due metodi chiamati  $T_1$  e  $T_2$ , il modo in cui vengo-

no formulati i due problemi, garantisce una maggiore rispondenza con i dati sperimentali rispetto al caso precedente. In Fig. 3.17 e Fig. 3.18 infatti si può vedere l’andamento della funzione obiettivo ( $T_1$  e  $T_2$  rispettivamente) in funzione del numero di iterate. Come si può notare, oltre un certo numero di iterazioni (circa 50 e 100 rispettivamente) il valore della funzione obiettivo tende a stabilizzarsi ed a convergere. Questo risultato, seppure oneroso in termini di costi di calcolo (si ricorda che ogni iterazione include un’analisi FEM in tre dimensioni della prova di trazione considerata), conduce a risultati coerenti ed affidabili, come si può dedurre confrontando le due Fig. 3.15 e Fig. 3.16. Infatti in questo modo può essere confermata la dualità tra i due approcci in termini dei risultati ottenuti, oltre che per il modo in cui sono stati formulati.

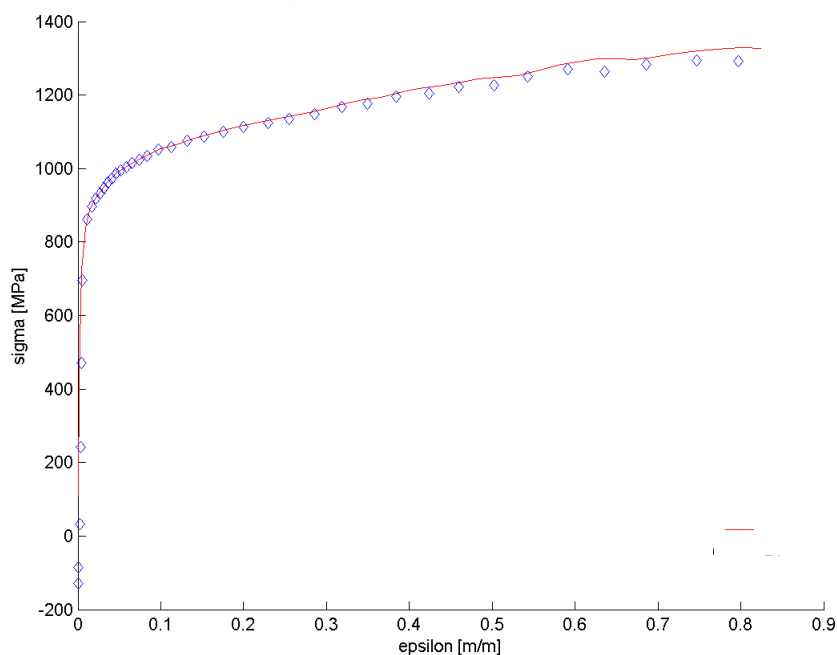


Figura 3.17: Curva identificata col modello 2D (pallini blu), e curva ottenuta durante la modellazione FE (curva rossa continua), relativa ad un medesimo elemento della zona strizionata, posto all’estremità del provino.

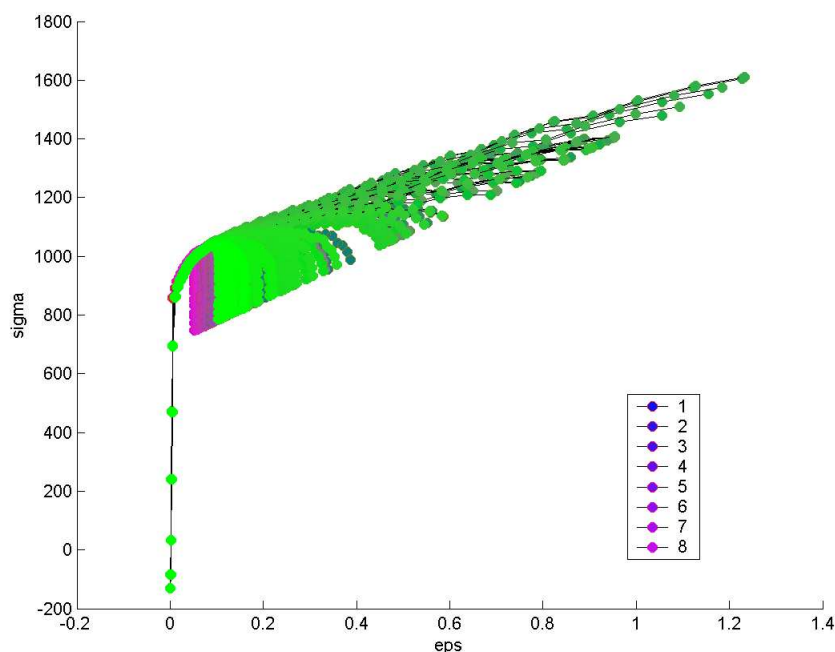


Figura 3.18: Curve ottenute a partire da una mesh con elementi di lato di 30 pixel. Le deformazioni sono espresse in  $[m/m]$  mentre gli sforzi in  $[MPa]$ .

### 3.4 Conclusioni.

La metodica qua presentata per identificare i parametri di una legge di incrudimento per una lega metallica, ricorrendo a misure a campo intero relative alle superfici laterali di provini a sezione rettangolare, può essere impiegata anche per leggi di incrudimento diverse da quella qua proposta. Il metodo di ricerca di un primo set di parametri permette già di identificare una legge di plasticità da utilizzare nella modellazione numerica di molti casi reali, con una rispondenza sufficientemente soddisfacente. Inoltre i due approcci automatizzati, cosiddetti  $T_1$  e  $T_2$  (uno duale dell'altro), portano a risultati coerenti tra loro, oltre che permettere di identificare dei parametri plastici che garantiscono una maggior rispondenza con i dati sperimentali, ottenuti con la DIC, rispetto al caso dei parametri identificati con il metodo

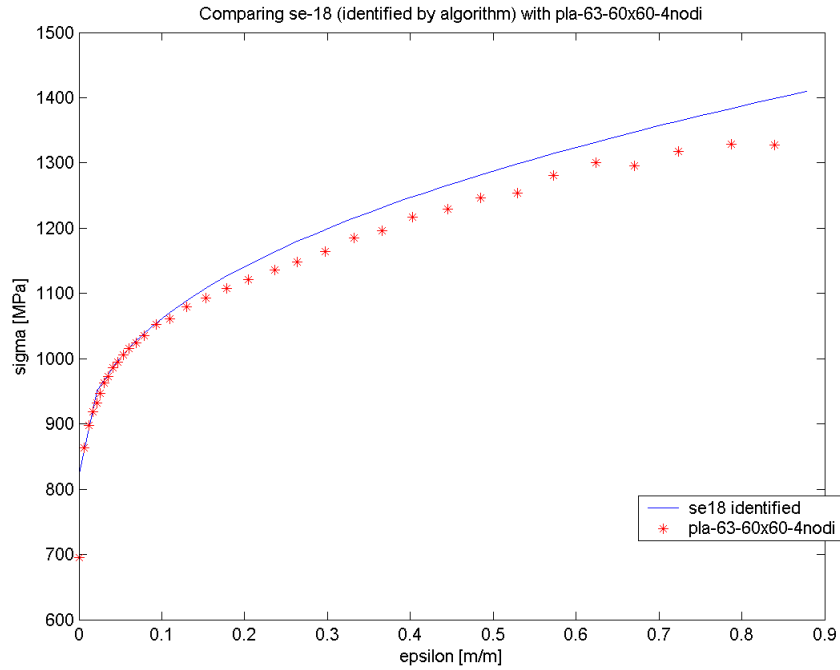


Figura 3.19: *Curva identificata col metodo  $T1(blue)$  e confronto con la curva identificata col metodo 1D (punti rossi).*

di start up. I risultati ottenuti sono incoraggianti e permettono di ottenere, in fase di modellazione agli elementi finiti delle prove sperimentali, una forte rispondenza col comportamento reale del materiale testato.

Inoltre vale la pena di fare una considerazione circa l'affidabilità garantita dalla modalità di identificazione seguita. Il gran numero di dati, resi disponibili dalle misure a campo intero sul comportamento cinematico della superficie del provino, unita alla conoscenza delle altre condizioni al contorno, permette con il metodo proposto di identificare in modo automatico, delle leggi per il comportamento plastico. Inoltre, al contrario di quel che accade nell'identificazione condotta con altri sofisticati metodi numerici che lavorano sulla base di pochissimi dati sperimentali, nei quali l'esperienza di chi conduce l'analisi ha un ruolo fondamentale ed imprescindibile per discriminare i risultati, con i metodi proposti in questo lavoro, se i dati

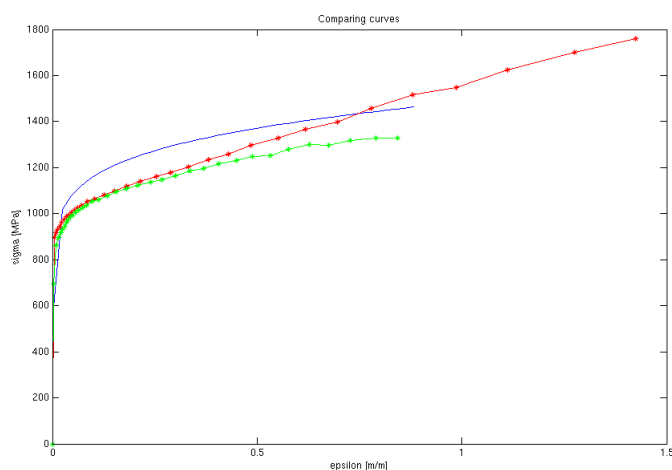


Figura 3.20: *Curva identificata col metodo T2 (in blu) e curve identificate con la correlazione digitale metodo 1D utilizzando elementi di lato 60 pixel (in rosso) ed elementi di lato 30 pixel (in verde).*

disponibili hanno una sufficiente risoluzione (sia spaziale che temporale), i risultati ottenuti (vale a dire la legge costitutiva del materiale) non possono essere influenzati dall'intervento esterno di chi conduce l'identificazione.

Infine le metodiche qua proposte possono essere usate per identificare i parametri di qualunque legge di incrudimento. Noi abbiamo usato un modello di Ramberg-Osgood in ragione della isotropia del materiale considerato e della geometria presa in esame. Tuttavia qualunque legge costitutiva può essere identificata con la metodologia proposta.

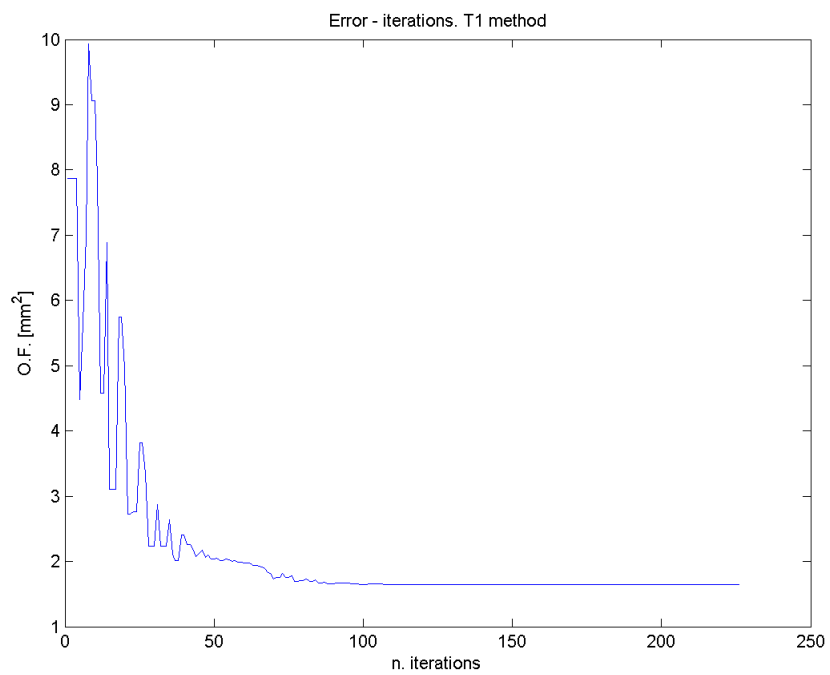


Figura 3.21: *Funzione obiettivo T1 in funzione del numero di iterazioni.*

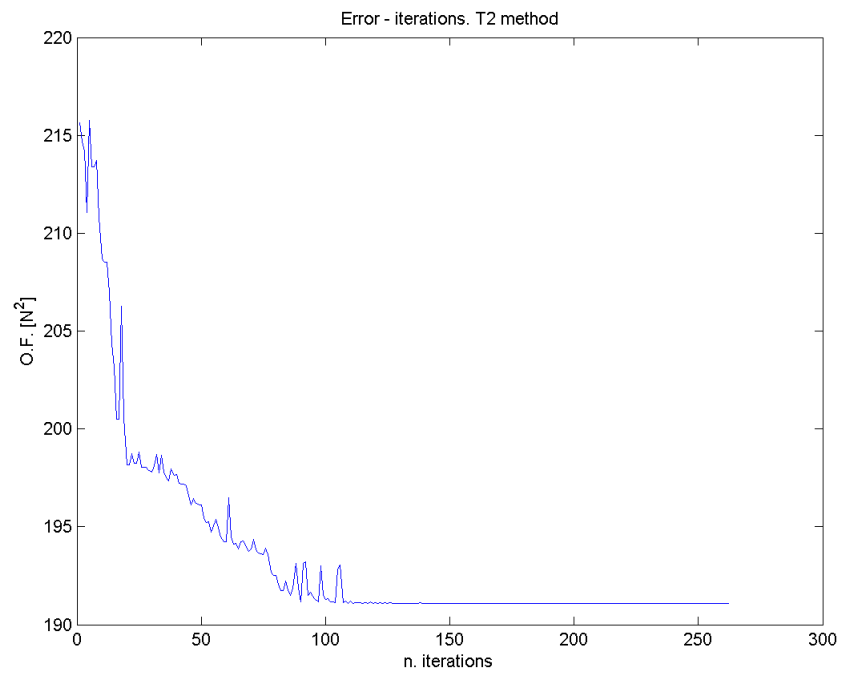


Figura 3.22: Funzione obiettivo  $T2$  in funzione del numero di iterazioni.



## Capitolo 4

# Identificazione dei parametri di danneggiamento per il modello CDM.

Al fine di identificare i parametri di danneggiamento di una legge CDM (quella di Bonora oppure quella di L  maitre), si    condotta una campagna sperimentale su provini piatti (di sezione rettangolare) a profilo lungo ed a profilo corto. Le prove sono state eseguite su macchina servoidraulica di trazione-compressione dinamica, sottoponendo i provini a rampe di carico-scarico in controllo di spostamento. I saggi di prova sono stati strumentati con un estensimetro a resistenza (*strain gauge*) incollato nella zona centrale (quella in cui si presume si localizzi la strizione). Inoltre    stato realizzato un particolare set-up per acquisire contemporaneamente ed in modo sincrono le immagini relative a due superfici laterali del provino, da utilizzare per eseguire misure a campo intero di deformazioni e spostamenti per mezzo della correlazione digitale di immagini. Sulle superfici, sulle quali fare la misura,    stato praticato uno *speckle*, spruzzando delle vernici sintetiche bianca e nera, in modo da generare delle macchie di dimensioni opportune, casuali ed uniche (ovvero le une diverse dalle altre). Le immagini sono state acquisite con una telecamera CCD ad alta risoluzione (PCO Pixel-fly QE), dotata di ottica telecentrica (EdmundOptics ). Inoltre, al fine di acquisire in sincrono e nello stesso fotogramma le immagini relative a due facce del provino che si trovano tra loro ortogonali,    stato posizionato uno specchio che riflette l’immagine di una delle due facce nella direzione della

videocamera.

## 4.1 Configurazione sperimentale.

I provini, di cui è illustrata la geometria in Fig. 4.11, sono stati sottoposti a prova di trazione monoassiale con rampe di carico-scarico. Sono stati strumentati su una faccia con un estensimetro a resistenza HBM con base di misura di  $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$  con lo scopo di avere una misura locale delle deformazioni nella primissima fase elastica della prova. Pur essendo la natura di questa misura locale, dato lo stato di tensione quasi uniforme del materiale e quindi presumendo che il campo di deformazione sia pressoché uniforme nel tratto a sezione costante, la misura scaturita dalla tecnica estensimetrica offre per di più una maggiore precisione della correlazione digitale di immagini per le piccole deformazioni.

Sull'altra faccia dei provini è stata prodotta la texture per la tecnica DIC, utilizzando vernici acriliche spray. È stato creato uno sfondo bianco uniforme e poi una serie di macchioline casuali nere che, grazie al metodo spray di applicazione della vernice, risultano estremamente semplici da produrre. In Fig. 4.2 si può osservare un provino strumentato durante lo svolgimento della prova. Le prove sono state condotte in controllo di spostamento, seguendo la storia di carico reale che si può vedere in Fig. 4.4, ma che è stata pilotata avendo come set point i punti determinati a priori (Fig. 4.5), conoscendo la legge costitutiva plastica identificata con i metodi esposti nel capitolo 3, partendo dai dati sperimentali di una prova di trazione uniassiale monotona.

Figura 4.1: *Geometria del provino a sezione rettangolare usato per le prove di carico-scarico.*

## 4.2 Analisi delle immagini attraverso la Digital Image Correlation.

Dopo aver acquisito le immagini e le informazioni di carico, deformazione locale (misurata da un estensimetro) e spostamenti della traversa mobile durante le prove di carico-scarico, abbiamo processato i dati usando la

#### 4.3 TECNICA DI IDENTIFICAZIONE. EQUILIBRIUM GAP METHOD. 41

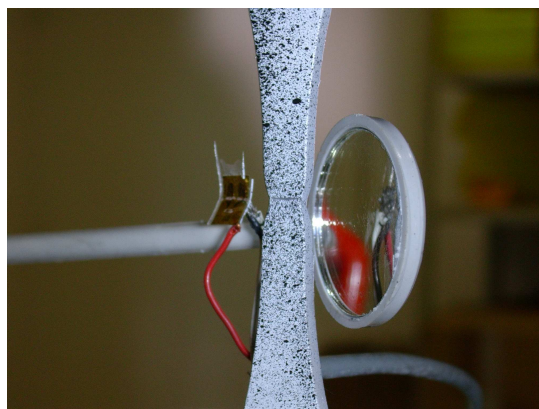


Figura 4.2: *Provino durante lo svolgimento della prova, alla rottura.*

tecnica della digital image correlation per ottenere i valori a campo intero di spostamenti e deformazioni. A tale scopo abbiamo adoperato il software DicFEMC0 del Prof. Bertolino.

Abbiamo ottenuto le misure di correlazione sia sulla faccia frontale, direttamente inquadrata dalla telecamera, (come indicato in Fig. 4.6) che su quella laterale, immagine riflessa dallo specchio laterale, come in Fig. 4.7. Nelle Fig. 4.8, 4.9, 4.9,4.10,4.11 si possono vedere le immagini in colore dei campi di spostamento e deformazione sulle due facce.

### 4.3 Tecnica di identificazione. Equilibrium Gap Method.

Il metodo di identificazione proposto, chiamato *Equilibrium Gap Method* (EGM), è stato messo a punto da Hild, Roux, Claire e successivamente perfezionato da Roux e Hild del LMT-Cachan.

Esso consiste nel determinare un campo di proprietà elastiche che tenga conto del campo di spostamenti ad ogni fase del carico. Si consideri per semplicità il danneggiamento inteso come una grandezza scalare,  $D(x)$ , tale che il modulo di Young si riduca a  $(1 - D)E_0$ , dal suo valore iniziale  $E_0$  sino a che il valore del coefficiente di Poisson  $\nu$  rimane inalterato.

Lo spirito del equilibrium gap method consiste nello sfruttare la condizione di equilibrio, valida in assenza di forze esterne,

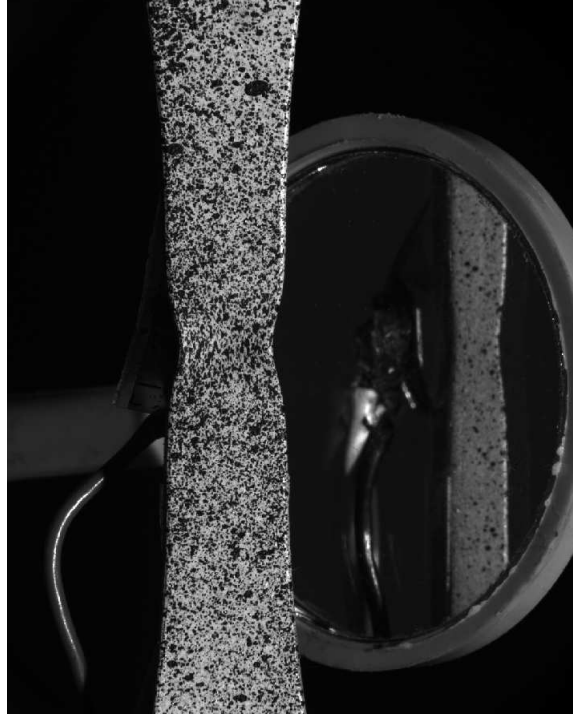


Figura 4.3: *Provino durante lo svolgimento della prova. Acquisizione simultanea nelle due direzioni ortogonali.*

$$\operatorname{div} [(1-D(x))C_0\varepsilon(U)] = 0 \quad (4.1)$$

dove  $C_0$  è il tensore di Hook,  $\varepsilon(U)$  la deformazione dedotta dal campo di spostamenti  $U$  e  $D(x)$  il danneggiamento nel punto  $x$ .

Dato che il campo di spostamenti viene naturalmente discretizzato in una serie di elementi finiti (mesh), possiamo ricondurci alla corrispondente formulazione del equilibrium gap method in termini finiti, ovvero

$$(1-D)_m K_{ijm} U_j = 0 \quad (4.2)$$

#### 4.3 TECNICA DI IDENTIFICAZIONE. EQUILIBRIUM GAP METHOD. 43

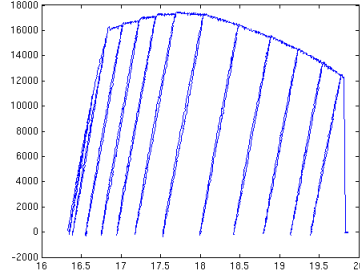


Figura 4.4: *Storia di carico a cui sono stati sottoposti i provini.*

dove  $K_{ijm}$  è la matrice di rigidità elementare del  $m$ -esimo elemento non danneggiato, soggetto alla componente di spostamento  $U_j$  soggetto alla forza nodale  $F_i$  (la cui somma estesa a tutti gli elementi è uguale a zero per i nodi interni). La matrice di rigidità è linearmente dipendente dalla riduzione di rigidità  $(1 - D)$ . Si noti però che per modelli di danneggiamento più complessi (danneggiamento anisotropo) questa proprietà può non essere rispettata.

Come si può facilmente osservare, dato che vengono usate informazioni non statiche il campo  $(1 - D)$  viene determinato a meno di fattore di scala arbitrario. Questo è l'inconveniente che si presenta perché si conoscono le sole informazioni cinematiche. La formulazione risulta completa imponendo che il valor medio  $(1 - D)$  sia uguale a una costante. Ciò si ottiene utilizzando un moltiplicatore di Lagrange oppure eliminando un valore del danneggiamento.

Per campi di danneggiamento arbitrari il problema è mal posto e qualche regolarizzazione è necessaria. L'approccio più diretto consiste nel trovare la *miglior* soluzione per il campo  $D$  in un sottospazio di campi varianti debolmente nello spazio.

Introducendo delle *shape functions*  $N_{mi}$  che fornisce il peso del centro di un elemento  $m$  per la  $i$ -esima funzione di base tale che

44 IDENTIFICAZIONE DEI PARAMETRI DI DANNEGGIAMENTO PER IL MODELLO CDM. 4.3

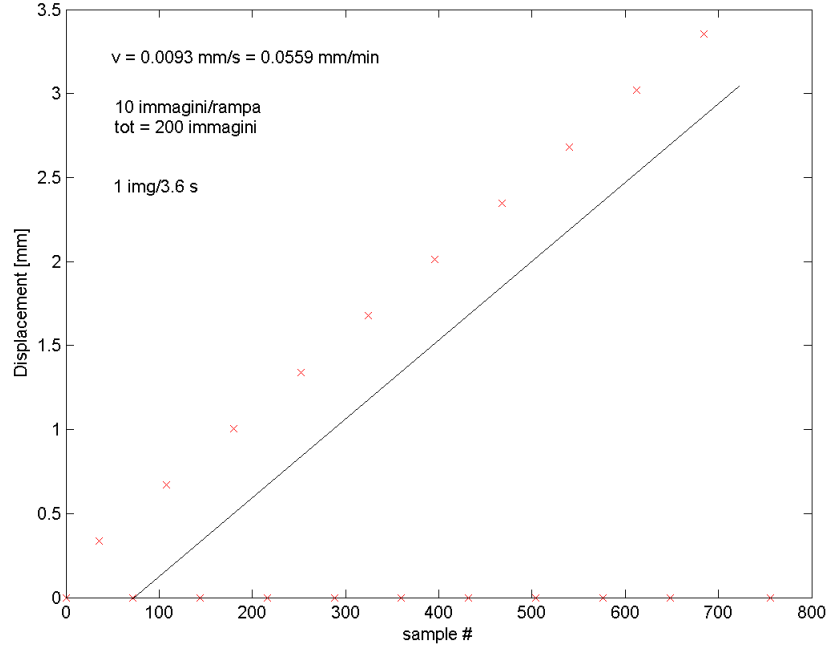


Figura 4.5: Set-point di carico seguiti dal sistema di controllo della macchina servoidraulica durante le prove di carico-scarico.

$$(1-D)_m = N_{mi}b_i \quad (4.3)$$

Tale regolarizzazione limita il numero di gradi di libertà e perciò il campo di danneggiamento è ottenuto attraverso la minimizzazione del

$$W(b) = \sum_j \left( \sum_{mi} L_{jm} N_{mi} b_i \right)^2 - \lambda \sum_{mi} N_{mi} b_i \quad (4.4)$$

#### IDENTIFICAZIONE DEI PARAMETRI DELLA LEGGE DI DANNEGGIAMENTO 4.4 OPPURE DI UNA LEGGE DI DANNEGGIAMENTO. 45

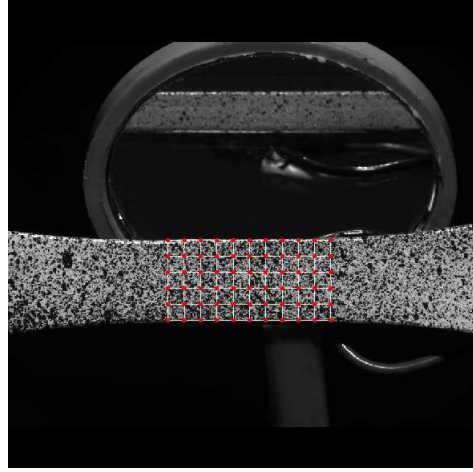


Figura 4.6: *Mesh per la correlazione digitale sulla faccia frontale del provino.*

dove  $L_{jm} = K_{ijm}U_i$  e  $\lambda$  è il moltiplicatore di Lagrange del danneggiamento medio vincolato.

La minimizzazione del funzionale  $W$  consiste nella risoluzione di un problema lineare che fornisce le ampiezze  $b$  e quindi il valore del danneggiamento per ogni elemento.

La semplicità del problema lineare presenta però uno svantaggio ovvero che la minimizzazione di  $W$  potrebbe portare a valori di  $D$  maggiori di 1 e quindi rigidezze negative.

Tuttavia vale la pena di sottolineare che la presente formulazione permette di slegare la discretizzazione del campo di danneggiamento da quello di spostamenti.

#### **4.4 Identificazione dei parametri della legge di danneggiamento oppure di una legge di danneggiamento.**

Noti i campi di danneggiamento si possono pertanto identificare i parametri di danneggiamento come indicato da Bonora. Infatti, nota l'evoluzione della variabile danneggiamento in funzione della deformazione, si può identificare l'esponente  $\alpha$  attraverso un fitting ed i parametri  $\varepsilon_{th}$ ,  $\varepsilon_{cr}$  e  $D_{cr}$ .

Un'ulteriore possibilità consiste nel trovare una legge di incrudimento,

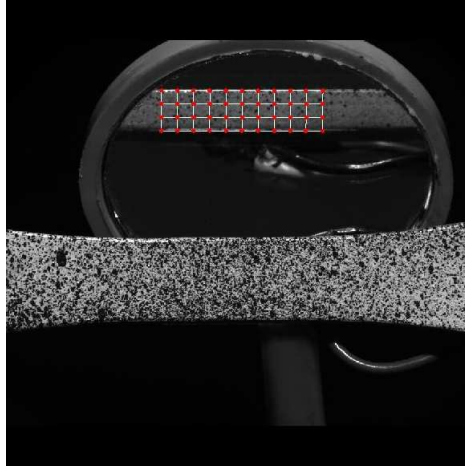


Figura 4.7: *Mesh per la correlazione digitale sulla faccia laterale del provino.*

noto l'andamento della variabile  $D$  in funzione della deformazione, prescindendo dalla ricerca dei parametri per il modello di Bonora o di Lemaitre o un altro noto.



IDENTIFICAZIONE DEI PARAMETRI DELLA LEGGE DI DANNEGGIAMENTO  
4.4 OPPURE DI UNA LEGGE DI DANNEGGIAMENTO. 47

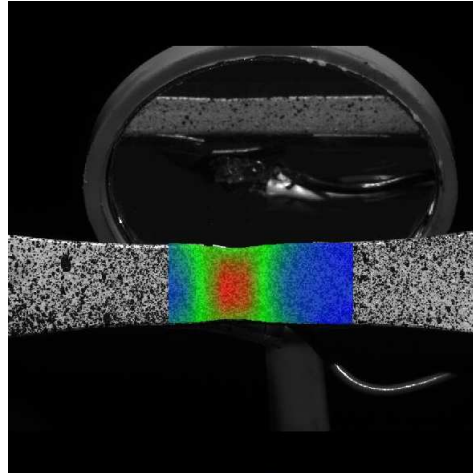


Figura 4.8: *Campo di deformazioni in direzione x (orizzontale).*

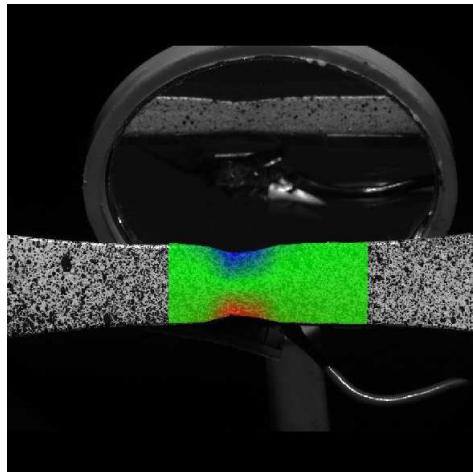


Figura 4.9: *Campo di deformazioni in direzione y (verticale).*

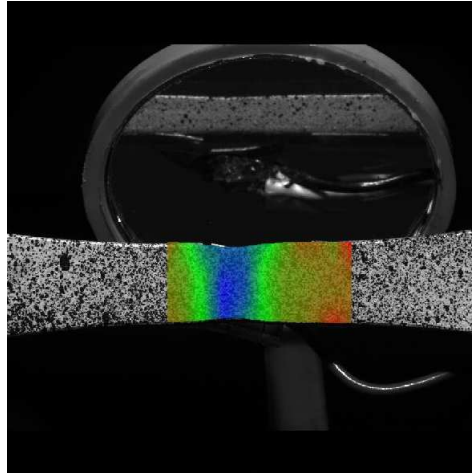


Figura 4.10: *Campo di deformazioni  $\text{emph}\gamma$ .*

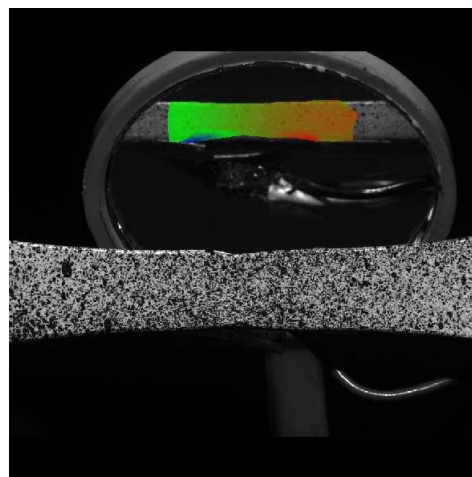


Figura 4.11: *Campo di deformazioni in direzione orizzontale sulla faccia laterale del provino.*

## Capitolo 5

# Valutazioni e sviluppi futuri

Alla luce delle problematiche affrontate, ci proponiamo qua di mettere in evidenza gli aspetti che richiedono ulteriori approfondimento e quelli che invece potrebbero essere degli spunti per sviluppare la ricerca sul danneggiamento, utilizzando altri approcci teorici o altre metodiche sperimentali.

Per ciò che attiene all’implementazione numerica del modello di danneggiamento nel codice di calcolo agli elementi finiti usato, è evidente che non si sono presentati problemi particolari. D’altronde anche in un altro codice di calcolo FEM evoluto non si presenterebbero particolari problemi, dato il tipo di modello scelto. Esso infatti non solo esprime l’evoluzione della funzione di danneggiamento in funzione solamente dello stato di tensione, della storia di carico e dei parametri caratteristici dei materiali ma viene caratterizzato da parametri di chiaro significato fisico. Inoltre il danneggiamento e l’incrudimento vengono trattati analiticamente in modo separato (o *disaccoppiato*), permettendo il non piccolo vantaggio di poter eseguire separatamente l’identificazione sperimentale.

Per quel che riguarda l’identificazione della legge di incrudimento, si ritiene che tecniche di correlazione digitale stereo possano permettere un ulteriore avanzamento in termini di accuratezza della misura in quanto, conoscendo anche gli spostamenti fuori dal piano delle superfici dei saggi analizzati, ne beneficerebbe notevolmente in particolare la tecnica di ricerca automatizzata dei parametri di una legge di incrudimento.

La tecnica di ricerca dei parametri di danneggiamento necessita ancora di ulteriori acquisizioni e validazioni sperimentali, anche alla luce dei risultati che potrebbero scaturire dalla ricerca di nuove geometrie di provino

studiate all’uopo.

Tuttavia ci preme sottolineare che sono emersi dei punti sui quali focalizzare l’attenzione.

Il primo riguarda la necessità di generare in fase sperimentale degli stati di tensione con valori della triassialità opportunamente scelti in un campo di valori ben più ampio di quello che si è ottenuto sinora per validare il metodo.

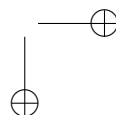
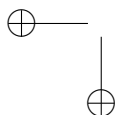
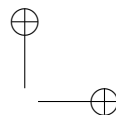
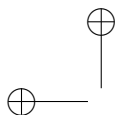
Un altro punto riguarda la possibilità di vedere finalmente le *fibre* più sollecitate grazie alla scelta di opportune geometrie.

Infine riteniamo che sviluppando e rendendo più sensibile la tecnica del Equilibrium Gap Method, si possa identificare una legge di danneggiamento *qualunque*, a prescindere da un modello scelto *a priori*. Ovvero che si possa evidenziare un andamento del danneggiamento (misurato *direttamente*) in funzione di altre grandezze che caratterizzano la storia di carico (come per esempio la deformazione plastica equivalente). In questo modo potrebbe emergere, come da più parti si sostiene, la necessità di ricorrere a modelli o leggi diverse in funzione dei materiali, delle condizioni di carico e dell’accuratezza considerati.

## Capitolo 6

# Conclusioni

Il lavoro presentato, nonostante l'evidente complessità degli argomenti affrontati, mostra che i tempi sono maturi per un uso industriale dei modelli di previsione basati sul danneggiamento. Infatti, seppure si debba lavorare ancora su particolari aspetti, è ormai chiaro che i benefici ottenuti sarebbero notevoli. In primo luogo, grazie alla possibilità di prevedere l'evoluzione del danneggiamento, sarebbe particolarmente avvantaggiata la sicurezza di moltissime opere ingegneristiche e industriali di larga diffusione. Poi non si dovrebbe trascurare la ripercussione in termini economici, derivata dalla possibilità di risparmiare materiali laddove non fosse necessario e invece di rendere decisamente più affidabili molti prodotti progettati alla luce della conoscenza dell'evoluzione del danneggiamento in seno ai materiali di cui son costituiti.



## Appendice A

# Sub-routines di MSC Marc

## A.1 Implementazione del modello di danneggiamento

In quest'appendice si illustreranno le subroutine scritte per implementare il modello di danneggiamento di Bonora-Lêmaître all'interno del codice Marc.

Il software FEM Marc permette di utilizzare delle user subroutines scritte dall'utente in Fortran, al fine di permettere l'implementazione di modelli e funzioni non previste dal codice originale.

Per lo scopo ci si è serviti di alcune possibilità offerte dal programma: esso prevede, tra i modelli di danneggiamento, un modello à la Katchanov, in grado di descrivere bene quello da noi considerato, che fa uso di un coefficiente moltiplicativo (chiamato  $df$ ), il cui valore calcolato dalla user-subroutine, aggiorna il valore di snervamento attuale e di  $E$  attuale ( $E'$ ).

Essendo il significato di  $df$  analogo a quello della  $D$  nel modello considerato, si è scritta una routine che ne calcola il valore a ogni passo d'integrazione. Essa necessita di ricevere in ingresso un certo numero di grandezze che vengono passate in parte dal software Marc tramite i parametri della routine e in parte interrogando il data base interno del solutore utilizzando specifiche routines già presenti nella libreria di supporto del Marc.

Per quel che riguarda l'algoritmo numerico, sono stati implementati due metodi di integrazione dell'equazione differenziale che sta alla base del modello: quello di Eulero e quello di Runge-Kutta del  $IV$  ordine. A livello pratico, pur offrendo ciascuno di essi dei vantaggi e degli svantaggi, fino ad oggi non sono state rilevate differenze sensibili di prestazioni né di affidabilità tra i due metodi numerici (È ben noto che L'algoritmo di

## 54 APPENDICE A

Eulero necessita di passi di integrazione piccoli, ma questi sono necessari anche per il modello di danneggiamento di Gurson. Ad oggi sono stati fatti essenzialmente test comparativi tra i due modelli di danneggiamento per cui questo problema non è stato riscontrato).

Il modello è stato implementato in due varianti di cui la prima utilizza la user sub-routine UDAMAG mentre la seconda si basa sulla user sub-routine ELEVAR. La ELEVAR viene chiamata una volta per ciclo (al termine dei calcoli) mentre la UDAMAG viene attivata al momento del calcolo della matrice di rigidezza, per cui, se il passo viene iterato, viene attivata più volte.

### A.1.1 Integrazione col metodo di Eulero

Di seguito viene presentato il listato della routine UDAMAG con integratore di Eulero.

```

      subroutine udamag(m,n,nn,kc,mats,eplas,erate,dt,dtdl,
* damdat,damfac,time,delttime)
      implicit real*8 (a-h,o-z)
      dimension dt(3),dtdl(2),damdat(1)

c
c      user subroutine to calculate damage factor
c
c      m          element number
c      n          elsto number
c      nn         integration point number
c      kc         layer
c      mats       material id
c      eplas      equivalent plastic strain
c      erate      equivalent plastic strain rate
c      dt         state variables at begining of increment
c      dtdl       incremental state variables
c      damdat     material data, damdat(1) is initial damage factor
c      damfac     current damage factor
c      time       time - begining of increment
c      deltime    incremental time
c include 'F:\Programmi\marc\marc2003\common\damage'
c call damage
c common /damage/g1,g2,g3,g4,g5,g6,g7

```



IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO DI DANNEGGIAMENTO 55

```
c      marc passa il primo parametro di Gurson come valore iniziale di damf
C      per cui d0 = damdat(1)
      poiss = .3
      a      = .2173
      ef      = .93
      pth     = .223
      d0      = damdat(1)
      dcr     = .065
c      dcr    = 0.9
if ( dt(3) .lt. time) then
c      Legge la Sigma Idrostatica
call elmvar(18,m,nn,kc,sh)
c Legge Plastic Strain rate
      call elmvar(28,m,nn,kc,dp)
c Legge Equivalent plastic strain (V.M.)
c      call elmvar(27,m,nn,kc,p)
c      Legge epsilon plastica equivalente
call elmvar(7,m,nn,kc,eeplas)
c      Legge epsilon elastica equivalente
call elmvar(127,m,nn,kc,eeelas)

if (seq. eq. 0.) then
seq = 1e-8
end if

if (eplas .eq. 0.) then
eplas = 1e-8
end if

sigma = (sh/seq)**2.
fua    = fuu+3.*(1. - 2.*poiss)*sigma
dtdl(2) = 0
if (fua .gt. 0.) then
etot=eth*((eeelas+eeplas)/eth)**(1/fua)
if ((damfac .lt. dcr) .and. (erate*etot .gt. 0.)) then
dtdl(2) = deltime*fua*a*(dcr-d0)**(1./a) /
c      dtdl(2) = fua*a*(dcr-d0)**(1./a) /
c Sostituisco eplas con etot
```

## 56 APPENDICE A

```

c
      + (log(ef/eth)) * (dcr-damfac)**((a-1.)/a)*erate/etot
end if
if (damfac .gt. dcr) then
  damfac = dcr
      dtdl(2)=0
end if
c  dt(2) = damfac
c  QUA inizia ***
if ((m .eq. 2871) .and. (kc .eq. 1) .and. (nn .eq. 1)) then
      write(71,100) seq,(eeelas+eeplas)
      write(72,101) damfac,eplas,time
c      write(71,100) sigma,fua,eplas,erate,damfac
c      write(71,100) sh,seq,erate,eplas,fua,damdat(1),damfac
c      write(71,101) m,n,nn,kc,mats
c      write(71,102) dt(2),dtdl(2),time,delttime
c write(71,102) g1,g2,g3,g4,g5,g6,g7
endif
c  QUA FINISCE ***
endif
endif
dt(3) = time
c  qui c'era ***
  100 format (e12.6,' ',e12.6)
  101 format (e12.6,' ',e12.6,' ',e12.6)
c  100 format ('sgm=',e12.6,' f=',e12.6,' epl=',e12.6,' dp=',e12.6,
c      +' D=',e12.6)
c  100 format('Bon1: sH=',e12.6,' sEq=',e12.6,' dp=',e12.6,' p=',e12.6,
c      +' T=',e12.6,' damdat=',e12.6,' damfac=',e12.6)
c  101 format('Bon2: m=',i5,' n=',i4,' nn=',i2,' kc=',i2,' mats=',i2)
c102 format('Bon3: g1=',e16.8,' g2=',e16.8,' g3=',e16.8,' g4=',e16.8,
c      +' g5=',e16.8,' g6=',e16.8,' g7=',e16.8)
  102 format('dt=',e12.6,' dtdl=',e12.6,' time=',e12.6,' delt=',e12.6)
      return
end

subroutine uactive(m,n,mode,irststr,irststn,inc,time,timinc)
implicit real*8 (a-h,o-z)

```

IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO DI DANNEGGIAMENTO 57

```
dimension m(2)

c
c user routine to activate or deactivate an element
c
c m(1)      - element number
c m(2)      - master element number
c n         - internal element number
c mode=-1   - deactivate element
c mode=2    - leave in current status
c mode=1    - activate element
c irststr   - reset stresses to zero
c irststn   - reset strains to zero
c inc       - increment number
c time      - time at begining of increment
c timinc    - incremental time
c
c NUMBER OF LAYERS PER ELEMENT: NSTRM2
c NUMBER OF INT. PTS PER ELEMENT: INTEL
include 'F:\Programmi\marc\marc2003\common\elmcom'
c call elmcom
c common /
c leggiamo il numero di layers e punti di integrazione dal common
isw = 0
dcr  = .118
c dcr  = 0.9
DO 1,i=1,intel
  DO 1,j=1,nstrm2
    call elmvar(29,m(1),i,j,curDam)
    if (curDam .ge. dcr) then
      isw = 1
      goto 2
    endif
1  continue
2  if (isw .eq. 1) THEN
    write(72,100) m(1),curDam
c    mode = -1
    irststr = 1
    irststn = 1
```

## 58 APPENDICE A

```

        mode = 2
    else
        MODE = 2
    endif
100  format('disabling element=',i5,' 2nd stateVar=',e12.6)

    return
end

```

### A.1.2 Integrazione col metodo di Runge-Kutta.

Di seguito viene presentato il listato della routine con integratore di Runge-Kutta.

```

        subroutine udamag(m,n,nn,kc,mats,eplas,erate,dt,dtdl,
*  damdat,damfac,time,delttime)
        implicit real*8 (a-h,o-z)
        dimension dt(5),dtdl(2),damdat(1)

c
c      user subroutine to calculate damage factor
c
c      m          element number
c      n          elsto number
c      nn         integration point number
c      kc         layer
c      mats       material id
c      eplas      equivalent plastic strain
c      erate      equivalent plastic strain rate
c      dt         state variables at begining of increment
c      dtdl       incremental state variables
c      damdat     material data, damdat(1) is initial damage factor
c      damfac     current damage factor
c      time       time - begining of increment
c      deltime    incremental time
c include 'F:\Programmi\marc\marc2003\common\damage'
c call damage
c common /damage/g1,g2,g3,g4,g5,g6,g7
c      marc passa il primo parametro di Gurson come valore iniziale di d0
c      per cui d0 = damdat(1)

```

IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO DI DANNEGGIAMENTO 59

```
poiss = .3
a      = .2173
ef     = .93
d0     = damdat(1)
dcr    = .065
c      dcr    = 0.9
c      Legge la Sigma Idrostatica
      call elmvar(18,m,nn,kc,sh)
c Legge V.Mises eq. stress
      call elmvar(17,m,nn,kc,seq)
c Legge i valori dei parametri di Gurson

c Legge Plastic Strain rate
c      call elmvar(28,m,nn,kc,dp)
c Legge Equivalent plastic strain (V.M.)
c      call elmvar(27,m,nn,kc,p)
c      Legge epsilon plastica equivalente
      call elmvar(7,m,nn,kc,eeplas)
c      Legge epsilon elastica equivalente
      call elmvar(127,m,nn,kc,eeelas)

if (seq. eq. 0.) then
seq = 1e-8
end if

if (eplas .eq. 0.) then
eplas = 1e-8
end if

sigma = (sh/seq)**2.
fuu    = (1.+poiss)*2./3.
fua    = fuu+3.*(1. - 2.*poiss)*sigma
dtdl(2) = 0
h = 2*delttime
if (fua .gt. 0.) then
etot = eth*((eeelas+eeplas)/eth)**(1/fua)
ersuetotPR = dt(5)
      if ((damfac .lt. dcr) .and. (erate*etot .gt. 0.)) then
```

## 60 APPENDICE A

```

akuno = h*dt(3)
akdue = h*fua*a*(dcr-d0)**(1./a) /
      + (log(ef/eth)) * (dcr-damfac+akuno/2.)*(a-1.)/a)
      + *ersuetotPR
      + (log(ef/eth)) * (dcr-damfac+akdue/2.)*(a-1.)/a)
      + *ersuetotPR
akquattro = h*fua*a*(dcr-d0)**(1./a) /
      + (log(ef/eth)) * (dcr-damfac+aktre/2.)*(a-1.)/a)
      + *ersuetotPR
dtdl(2) = akuno/6.+akdue/3.+aktre/3.+akquattro/6.
damfac = damfac + dtdl(2)
dt(3) = dt(4)
dt(4) = fua*a*(dcr-d0)**(1./a) /
      + (log(ef/eth)) * (dcr-damfac)*(a-1.)/a)
      + *erate/etot
dt(5) = erate/etot
      end if
      damfac = dcr
      dtdl(2)=0
      dt(2)=dcr
c   dt(2) = damfac
endif
      if ((m .eq. 2871) .and. (kc .eq. 1) .and. (nn .eq. 1)) then
        write(71,100) seq,(eeelas+eeplas),dt(2)
        write(72,101) damfac,eplas,time
c       write(71,100) sigma,fua,eplas,erate,damfac
c       write(71,100) sh,seq,erate,eplas,fua,damdat(1),damfac
c       write(71,101) m,n,nn,kc,mats
c       write(71,102) dt(2),dtdl(2),time,delttime
c write(71,102) g1,g2,g3,g4,g5,g6,g7
      endif
      100 format (e12.6,' ',e12.6,' ',e12.6)
      101 format (e12.6,' ',e12.6,' ',e12.6)
c 100 format ('sgm=',e12.6,' f=',e12.6,' epl=',e12.6,' dp=',e12.6,
c      +' D=',e12.6)
c 100 format ('Bon1: sH=',e12.6,' sEq=',e12.6,' dp=',e12.6,' p=',e12.6,
c      +' T=',e12.6,' damdat=',e12.6,' damfac=',e12.6)
c 101 format ('Bon2: m=',i5,' n=',i4,' nn=',i2,' kc=',i2,' mats=',i2)

```

# IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO DI DANNEGGIAMENTO 61

```

c102 format('Bon3: g1=',e16.8,' g2=',e16.8,' g3=',e16.8,' g4=',e16.8,
c      +' g5=',e16.8,' g6=',e16.8,' g7=',e16.8)
102  format('dt=',e12.6,' dtdl=',e12.6,' time=',e12.6,' delt=',e12.6)
      return
      end

      subroutine uactive(m,n,mode,irststr,irststn,inc,time,timinc)
      implicit real*8 (a-h,o-z)
      dimension m(2)

c
c      user routine to activate or deactivate an element
c
c      m(1)      - element number
c      m(2)      - master element number
c      n         - internal element number
c      mode=-1   - deactivate element
c      mode=2    - leave in current status
c      mode=1    - activate element
c      irststr   - reset stresses to zero
c      irststn   - reset strains to zero
c      inc       - increment number
c      time      - time at begining of increment
c      timinc    - incremental time
c
c      NUMBER OF LAYERS PER ELEMENT: NSTRM2
c      NUMBER OF INT. PTS PER ELEMENT: INTEL
      include 'F:\Programmi\marc\marc2003\common\elmcom'
c      call elmcom
c      common /
c      leggiamo il numero di layers e punti di integrazione dal common
      isw = 0
      dcr  = .118
c      dcr  = 0.9
      DO 1,i=1,intel
        DO 1,j=1,nstrm2
          call elmvar(29,m(1),i,j,curDam)
          if (curDam .ge. dcr) then
            isw = 1

```

62 APPENDICE A

```
        goto 2
    endif
1    continue
2    if (isw .eq. 1) THEN
        write(72,100) m(1),curDam
c        mode = -1
        irststr = 1
        irststn = 1
    else
        MODE = 2
    endif
100 format('disabling element=',i5,' 2nd stateVar=',e12.6)

return
end
```



## Appendice B

# Programmi per l'identificazione dei parametri di incrudimento

## B.1 Metodo *diretto*.

### B.1.1 Metodo unidimensionale.

La routine seguente permette di costruire una curva stress-strain, conoscendo il valore del carico applicato dalla macchina servoidraulica (che viene caricato nel vettore  $l$ ) e il campo di deformazioni calcolato tramite la DIC (caricato nella matrice  $s_{post}$ ). Al termine vengono stampati i risultati in  $\sigma_{maeps}.dat$  e disegnati i relativi grafici.

```
function [spost] = carica(nfile,dim)
% Lunghezza della stringa che contiene la parola " *** Loop...ecc."
lungloop = 23;
% Lunghezza della stringa che contiene la parola "Calcolo delle deformazioni"
lungelem = 50;
loop = ' *** Loop =';
elementi = ' Calcolo delle deformazioni medie su ogni elemento';
j = 0;
nn = 0;
nnn = 0;
fid = fopen(nfile);
while 1
    if ~ischar(tline), break, end
```

## 64 APPENDICE B

```
% Incremento numero del passo (o loop)
    if strcmp(tline,loop,lungloop)
        contapassi = ['Passo numero ',num2str(j)];
        disp(contapassi);
    end
% Apre il flag per caricare i dati degli elementi fra due passi
    if strcmp(tline,elementi,lungelem)
        nnn = 1;
        nn = 0;
    end
% Se il flag e' aperto, conta le righe ed inizia a caricare tra due
    if nnn == 1
        nn = nn+1;
    end
    if (nn > 2) && (nn < dim2)
        linea = str2num(tline);
        disp(tline);
        n0 = nn-2;
        spost(n0,gg,j) = linea(1,gg); %n0=numero elemento; gg=
% Se no rimette il flag a zero
        if nn >= dim2
            nnn = 0;
        end
    end
end
end
fclose(fid);

function [sigeps] = se(nfile,col,rig,passi,sy)
larg=6;
prof=3;
a0=larg*prof;
alfa=(3.5/360)*2*pi; %Inclinazione immagine rispetto all'asse della pro
coa=cos(alfa);
sea=sin(alfa);
conta=1;
fse=[0 0]';
elementi = col*rig;
```

```

spost=carica(nfile,elementi);
z0=zeros(rig,1);
ex0=zeros(rig,1);
ey0=zeros(rig,1);
for pass=1:passi;
    numel=0;
    for ii = 1:rig
        for eps = 3:4
            strix=0;
            for j = 1:col
                if eps == 1
                    strix(j) = spost(numel,4,pass)*sea;
                end
            end
            epss = eps-2;
            striscia(ii,epss,pass) = mean(strix)*0.000001;
        end
    end
end
t1=dlmread('t1.txt');
for i=1:40:1640
    l(conta)=t1(i,3);
    conta=conta+1;
end
ll=1*25000;
for pass=1:passi
    for ii=1:rig
        if pass==1
            sigmaold(ii)=ll(pass)/a0;
        end
        if sigmaold(ii)>=sy && flag_snerv(ii)==0
            flag_snerv(ii)=flag_snerv(ii)+1;
            z0(ii)=prof*(1+striscia(ii,1,pass));
        end
        if flag_snerv(ii)==1
            expl(ii)=striscia(ii,1,pass)-ex0(ii);
        else
            expl(ii)=0;
        end
    end
end

```

66 APPENDICE B

```

        eypl(ii)=0;
    end
    proff(ii)=(1-flag_snerv(ii))*prof*(1+striscia(ii,1,pass))+z0(ii);
    area(ii,pass) = larg*(1+striscia(ii,1,pass))*proff(ii);
    sigma(ii,pass) = ll(pass)/area(ii,pass);
    epsxx(ii,pass) = striscia(ii,1,pass);
    sigeps(1,ii,pass) = sigma(ii,pass);
    sigeps(2,ii,pass) = striscia(ii,2,pass);
end
end
figure(1);
for ii=1:rig
    si_ep = ['sigeps_',num2str(ii),'.dat'];
    s_e(:,1) = (sigma(ii,:))';
    s_e(:,2) = (eps(ii,:))';
    dlmwrite(si_ep,s_e);
%    figure;
    hold on;
    colo = ii/rig;
    colo2 = colo1*colo;
    plot(eps(ii,:),sigma(ii,:), 'ko-', 'MarkerEdgeColor', [colo1,colo,colo2]);
    legend('1','2','3','4','5','6','7','8')
    xlabel('eps');
    ylabel('sigma');
%    fse = [fse s_e'];
end
for pass=1:passi
    se_xx = ['se_x',num2str(pass),'.dat'];
    se_x(:,1) = sigma(:,pass);
    se_x(:,2) = eps(:,pass);
    se_x(:,3) = epsxx(:,pass);
    dlmwrite(se_xx,se_x);
    figure(2);
    hold on;
    plot(se_x(:,1), 'b*-');
    xlabel('striscia');
    ylabel('sigma');
    figure(3);

```

```

hold on;
plot(se_x(:,2),'r*-');
xlabel('striscia');
ylabel('epsilon y');
figure(4);
hold on;
plot(se_x(:,3),'g*-');
xlabel('striscia');
ylabel('epsilon x');
end
dlmwrite('sigma_eps.dat',sigeps)
%fitse=lsqcurvefit('FUN',0,fse(1,:),fse(2,:))

```

### B.1.2 Metodo bidimensionale.

La routine seguente permette di costruire una curva stress-strain per ogni elemento considerato nella correlazione digitale di immagini, conoscendo il valore del carico applicato dalla macchina servoidraulica (che viene caricato nel vettore  $l$ ) e il campo di deformazioni calcolato tramite la DIC (caricato nella matrice *spos*). Viene fatta una schematizzazione a blocchi 3D corrispondenti agli elementi bidimensionali considerati nella DIC. Al termine vengono stampati i risultati in *sigma\_eps.dat* e disegnati i relativi grafici per ogni elemento considerato.

```

function [spos] = carica(nfile,dim)
% Lunghezza della stringa che contiene la parola " *** Loop...ecc."
lungloop = 23;
% Lunghezza della stringa che contiene la parola "Calcolo delle deformazioni"
lungelem = 50;
dim2 = dim + 3;
loop = ' *** Loop =';
elementi = ' Calcolo delle deformazioni medie su ogni elemento';
j = 0;
nn = 0;
nnn = 0;
fid = fopen(nfile);
while 1
    tline = fgetl(fid);
    if ~ischar(tline), break, end

```

## 68 APPENDICE B

```
% Incremento numero del passo (o loop)
    if strcmp(tline,loop,lungloop)
        contapassi = ['Passo numero ',num2str(j)];
        disp(contapassi);
    end
% Apre il flag per caricare i dati degli elementi fra due passi
    nnn = 1;
    nn = 0;
% Se il flag e' aperto, conta le righe ed inizia a caricare tra due
    if nnn == 1
        nn = nn+1;
    end
    if (nn > 0) && (nn < 6)
%        disp(tline);
        for gg = 1:5
            spost(n0,gg,j) = linea(1); %n0=numero elemento; gg=col
        end
% Se no rimette il flag a zero
        if nn >= dim2
            nnn = 0;
        end
    end
end
end
fclose(fid);

function se(nfile,col,rig,passi,sy)
larg=6;
prof=3;
a0=larg*prof/col;
alfa=(3.5/360)*2*pi; %Inclinazione immagine rispetto all'asse della pr
coa=cos(alfa);
sea=sin(alfa);
conta=1;
fse=[0 0]';
elementi = col*rig;
spost=carica(nfile,elementi);
z0=zeros(rig,col);
```

```

ex0=zeros(rig,col);
for pass=1:passi;
    numel=0;
    for ii = 1:rig
        for j = 1:col
            for eps = 3:4
                if eps == 3
                    strizx(ii,j,pass) = 0.1*(spost(numel)*coa + spost(numel,3,pass));
                else
                    strizy(ii,j,pass) = 0.1*(spost(numel,3,pass)*sea + spost(numel,4,pass));
                end
            end
        end
    end
end
t1=dlmread('t1.txt');
for i=1:40:1640
    conta=conta+1;
end
ll=1*25000/col;
for pass=1:passi
    for ii=1:rig
        for j=1:col
            if pass==1
                sigmaold(ii,j)=ll(pass)/a0;
            end
            if sigmaold(ii,j)>=sy && flag_snerv(ii,j)==0
                flag_snerv(ii,j)=flag_snerv(ii,j)+1;
                z0(ii,j)=prof*(1+strizx(ii,j,pass));
                ex0(ii,j)=strizx(ii,j,pass);
                ey0(ii,j)=strizy(ii,j,pass);
            end
            if flag_snerv(ii,j)==1
                eypl(ii,j)=strizy(ii,j,pass)-ey0(ii,j);
            else
                expl(ii,j)=0;
            end
            proff(ii,j)=(1-flag_snerv(ii,j))*prof*(1+strizx(ii,j,pass))+z0(ii,j);
        end
    end
end

```

## 70 APPENDICE B

```

        area(ii,j,pass) = (larg/col)*(1+strizx(ii,j,pass))*proff(i
        sigma(ii,j,pass) = ll(pass)/area(ii,j,pass);
        epsxx(ii,j,pass) = strizx(ii,j,pass);
    end
end
end
figure(1);
for ii=1:rig
    for j=1:col
        si_ep = ['sigeps_',num2str(ii),num2str(j),'.dat'];
        for pass=1:passi
            s_e(pass,1) = sigma(ii,j,pass);
        end
        dlmwrite(si_ep,s_e);
%       figure;
        hold on;
        colo = ii/rig;
        colo2 = colo1*j/col;
%       fse = [fse s_e'];
    end
end
end
%dlmwrite('sigma_eps.dat',sigeps)
%fitse=lsqcurvefit('FUN',0,fse(1,:),fse(2,:))

```

### B.2 Identificazione automatizzata $T_1$ .

La presente routine, utilizzando il metodo del down hill, minimizza la funzione obiettivo  $T_1$ , considerando un set di parametri e lanciando un calcolo di Marc con i valori considerati. Una volta che il metodo è andato in convergenza, si possono vedere i risultati della simulazione nel corrispondente file di Marc *pl fit.t16*.

```

function [def,spost] = caricaeu(nfile,steps,dim,dimnod)
%dim = numero di elementi
%dimnod = numero di nodi
%steps = numero passi da considerare
% Lunghezza della stringa che contiene la parola "    *** Loop...ecc."
lungloop = 23;
% Lunghezza della stringa che contiene la parola "Calcolo delle deform

```



# IDENTIFICAZIONE AUTOMATIZZATA $T_1$ . 71

```

lungelem = 50;
lungnod = 39;
dimnod2 = dimnod + 3;
loop = '          *** Loop =';
elementi = ' Calcolo delle deformazioni medie su ogni elemento';
nodi = ' Coordinate e Spostamenti nodali DOPO l';
j = 0;
nn = 0;
onn = 0;
onnn = 0;
fid = fopen(nfile);
while 1
    if ~ischar(tline), break, end
% Incremento numero del passo (o loop)
    if strncmp(tline,loop,lungloop)
        j = j+1;
        disp(contapassi);
    end
% *** ELEMENTI ***
% Apre il flag per caricare i dati degli elementi fra due passi
    if strncmp(tline,elementi,lungelem)
        nn = 0;
    end
% Se il flag e' aperto, conta le righe ed inizia a caricare tra due
    if nnn == 1
        nn = nn+1;
    end
    if ((nn > 2) && (nn < dim2)) && (steps >= j)
        linea = str2num(tline);
%        disp(tline);
        for gg = 1:5
            def(n0,gg,j) = linea(1,gg); %n0=numero elemento; gg=colonna
        end
% Se no rimette il flag a zero
        if nn >= dim2
            nnn = 0;
        end
    end
end

```

## 72 APPENDICE B

```
% *** NODI ***
    if strcmp(tline,nodi,lungnod)
        onnn = 1;
    end
% Se il flag e' aperto, conta le righe ed inizia a caricare tra due
    if onnn == 1
        onn = onn+1;
    end
    if ((onn > 2) && (onn < dimnod2)) && (steps >= j)
%        disp(tline);
        for gg = 1:5
            spost(n0,gg,j) = linea(1); %n0=numero nodo; gg=colonna;
        end
% Se no rimette il flag a zero
        if onn >= dimnod2
            onnn = 0;
        end
    end
end
end
fclose(fid);
```

```
function t = ciclo(param,def,spost,ci,cj,col,rig,steps,dimnod)
nnn = 27000; %Numero corretto di elementi che deve contenere il file f
dmlwrite('param_iter.dat',param);
dos('copy param.log+param_iter.dat param.log');
se_incr(param,def,spost,ci,cj,col,rig,steps,dimnod);
dos('run_marc -j pl_fit -u fobiettivo');
%%% dos('run_marc -j pl_fit');
dos('copy pl_fit.out file.out');
ff = dlmread('forze.dat');
% Controllo sul nuemro di elementi di forze.dat: serve a evitare di cor
if ss<nnn
    t = 1e+16;
    disp('Attenzione!!! Marc non ha portato a termine l''analisi');
    param
else
end
```

```

dlmwrite('nrowsforze_iter.dat',ss);
dlmwrite('T_iter.dat',t);
dos('copy forze.dat reazioni_iter.dat');

function t = ciclo(param,def,spost,ci,cj,col,rig,steps,dimnod)
nnn = 2700000000000000000; % ***** ATTENZIONE INIZIALIZZARE ***** Numero d
dlmwrite('param_iter.dat',param);
dos('copy param.log+param_iter.dat param.log');
dos('copy forze0.dat UU.dat');
dos('run_marc -j pl_fit -u fobiettivoUU');
%%% dos('run_marc -j pl_fit');
dos('copy pl_fit.log file.log');
dd = dlmread('UU.dat');
%%% *** AGGIUSTARE LE VARIABILI IN INGRESSO *** UU = scrividisplfieldUU(nf
% Controllo sul nuemro di elementi di forze.dat: serve a evitare di consid
if ss<nnn
    t = 1e+16;
    param
    disp('Parametri (E,ni,sigma_y,Ky,My): ');
else
    t = sum(sum(ff))/ss
end
dlmwrite('nrowsforze_iter.dat',ss);
dos('copy nrowsforze.log+nrowsforze_iter.dat nrowsforze.log');
dos('copy forze.dat reazioni_iter.dat');
```

### B.3 Identificazione automatizzata $T_2$ .

La presente routine, utilizzando il metodo del down hill, minimizza la funzione obiettivo  $T_2$  (relativa alle forze nodali in superficie), considerando un set di parametri e lanciando un calcolo di Marc con i valori considerati. Una volta che il metodo è andato in convergenza, si possono vedere i risultati della simulazione nel corrispondente file di Marc *pl\_fit.t16*.

```
function [def,spost] = caricaeu(nfile,steps,dim,dimnod)
```

## 74 APPENDICE B

```
%dim = numero di elementi
%dimnod = numero di nodi
%steps = numero passi da considerare
% Lunghezza della stringa che contiene la parola "    *** Loop...ecc."
lungloop = 23;
% Lunghezza della stringa che contiene la parola "Calcolo delle deforma
lungelem = 50;
dim2 = dim + 3;
dimnod2 = dimnod + 3;
loop = '          *** Loop =';
elementi = ' Calcolo delle deformazioni medie su ogni elemento';
nodi = ' Coordinate e Spostamenti nodali DOPO 1';
j = 0;
nnn = 0;
onn = 0;
onnn = 0;
while 1
    if ~ischar(tline), break, end
% Incremento numero del passo (o loop)
    if strncmp(tline,loop,lungloop)
        contapassi = ['Passo numero ',num2str(j)];
%         disp(contapassi);
    end
% *** ELEMENTI ***
% Apre il flag per caricare i dati degli elementi fra due passi
    if strncmp(tline,elementi,lungelem)
        nnn = 1;
    end
% Se il flag e' aperto, conta le righe ed inizia a caricare tra due
    if nnn == 1
        nn = nn+1;
    end
    if ((nn > 2) && (nn < dim2)) && (steps >= j)
        linea = str2num(tline);
%         disp(tline);
        for gg = 1:5
            def(n0,gg,j) = linea(gg); %n0=numero elemento; gg=colore
        end
```

IDENTIFICAZIONE AUTOMATIZZATA  $T_2$ . 75

```
% Se no rimette il flag a zero
    if nn >= dim2
        nnn = 0;
    end
end
% *** NODI ***
    if strcmp(tline,nodi,lungnod)
        onnn = 1;
    end
% Se il flag e' aperto, conta le righe ed inizia a caricare tra due
    if onnn == 1
        onn = onn+1;
    end
    if ((onn > 2) && (onn < dimnod2)) && (steps >= j)
        linea = str2num(tline);
%        disp(tline);
        for gg = 1:5
            n0 = onn-2;
        end
% Se no rimette il flag a zero
        if onn >= dimnod2
            onnn = 0;
        end
    end
end
end
fclose(fid);
```

```
function t = ciclo(param,def,spost,ci,cj,col,rig,steps,dimnod)
nnn = 27000; %Numero corretto di elementi che deve contenere il file forze
dlmwrite('param_iter.dat',param);
dos('copy param.log+param_iter.dat param.log');
se_incr(param,def,spost,ci,cj,col,rig,steps,dimnod);
dos('copy forze0.dat forze.dat');
%%% dos('run_marc -j pl_fit');
dos('copy pl_fit.out file.out');
ff = dlmread('forze.dat');
ss = max(size(ff));
```

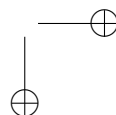
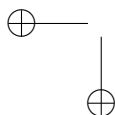
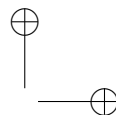
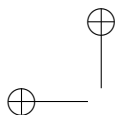
## 76 APPENDICE B

```
% Controllo sul nuemro di elementi di forze.dat: serve a evitare di co
if ss<nnn
    t = 1e+16;
    disp('Attenzione!!! Marc non ha portato a termine l''analisi');
    param
else
    t = sum(sum(ff))/ss
end
dmlwrite('T_iter.dat',t);
dos('copy nrowsforze.log+nrowsforze_iter.dat nrowsforze.log');
dos('copy forze.dat reazioni_iter.dat');

function t = cicloFFmor(param,def,spost,ci,cj,col,rig,passi,dimnod,nmor
param
nmor
pssprec
pssragg
% passin = passi - pel + 1
% pssprecin = pssprec - pel + 1
% pssraggin = pssragg - pel
ss = zeros(3);
% nnn = passi/2; % ***** ATTENZIONE INIZIALIZZARE ***** Numero corre
dim = col*rig;
nfile = 'DicFem_1.LOG';
% dlmwrite('param_iter.dat',param);
dos('copy param.log+param_iter.dat param.log');
dos('copy forze0.dat FF.dat');
dos('run_marc -j pl_fit -u fobiettivoFF');
%%% dos('run_marc -j pl_fit');
dos('copy pl_fit.out file.out');
dos('copy pl_fit.log file.log');
% udic = scrividisplfieldUU(nfile,passi,dim,dimnod,mmpixel);
% sudic = size(udic);
% ufem = zeros(sudic(1),sudic(2),sudic(3));
rfem = readffem;
ss = size(rfem);
```

IDENTIFICAZIONE AUTOMATIZZATA  $T_2$ . 77

```
% Controllo sul nuemro di elementi di forze.dat: serve a evitare di consid
if ss(2)<pssragg
    disp('Attenzione!!! Marc non ha portato a termine l''analisi');
    param
    disp('Parametri (E,ni,sigma_y,Ky,My): ');
else
    for i = pssprec:pssragg
        jj=0;
        for j = 1:54 % *** Attenzione!!! Ho messo tutto il campo di deforma
            jj=jj+1;
        end
    end
    t = sum(sum(tt))/54 % ^(passi/ss(2))
%     tt(ss+1,1) = 1234;
    dlmwrite('tt_iter.dat',tt);
    dos('copy tt.log+nmor_curr.dat+tt_iter.dat tt.log');
end
dlmwrite('nrowsforze_iter.dat',ss);
dlmwrite('T_iter.dat',t);
dos('copy nrowsforze.log+nmor_curr.dat+nrowsforze_iter.dat nrowsforze.log');
% dos('copy forze.dat reazioni_iter.dat');
```

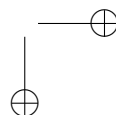
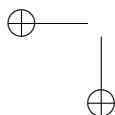
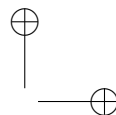
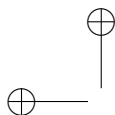


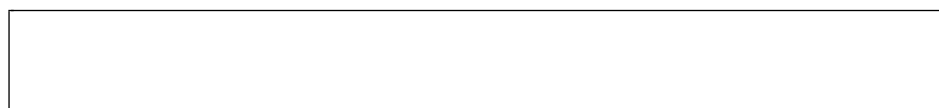




## Bibliografia

- [Kat57] L. Katchanov. *Eléments de la Théorie de la Plasticité*. Editions de Moscou, Paris, 1957.
- [Mar94] L. Markosian, P. Newcomb, R. Brand, S. Burson, and T. Kitzmiller. Using an enabling technology to reengineer legacy systems. *Communications of the ACM*, vol. 37(5):pp. 58–70, 1994.





## Colophon

This manuscript was typeset by the author with the  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$  Documentation System on a PC running Debian GNU/Linux (testing).

Text editing was done in *GNU Emacs* using the  $\text{AUCT}_{\text{E}}\text{X}$  package. The illustrations and graphs were created with *MSC Marc*, *Mathlab*, *DIC-FEM* (written by Prof. Filippo Bertolino), *GNU Gimp*, *Irfanview*, *Dia*, *gnuplot* and *Xfig* respectively.

The body type is 10 point Computer Modern Roman. Chapter and section titles are in various sizes of Adobe Helvetica-Narrow Bold. The monospace typeface used for program code is Adobe Courier.

Il manoscritto è stato dattilografato dall'autore con il  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$  Documentation System su un PC con sistema operativo Debian GNU/Linux (testing).

Il testo invece è stato editato in *GNU Emacs* usando il pacchetto  $\text{AUCT}_{\text{E}}\text{X}$ . Le illustrazioni e i grafici sono state realizzate ed elaborate con *MSC Marc*, *Mathlab*, *DIC-FEM* (scritto dal Prof. Filippo Bertolino), *GNU Gimp*, *Irfanview*, *Dia*, *gnuplot* e *Xfig* rispettivamente.

La font è la Computer Modern Roman di altezza 10 punti. I titoli dei capitoli e dei paragrafi sono di varia grandezza in Adobe Helvetica-Narrow Bold. Il carattere monospazio usato per la scrittura del codice è l' Adobe Courier.

## Indice analitico

- afferraggio, 7
- Bonora, 5, 53
- carico
  - monotòno, 6
  - periodico, 6
- CDM, 5
- correlazione digitale, 7, 67
- danneggiamento, 6, 53
- danneggiamento
  - evoluzione, 6
- DIC, 63, 67
- ELEVAR, 54
- estensimetri, 7
- estensimetria, 7
- Eulero, 6, 53, 54
- evoluzione
  - temporale, 6
- FEM, 53
- ForTran, 5, 53
- funzionale, 44
- Gurson, 54
- implementazione, 5, 53
- Katchanov, 5, 7, 53
- Lêmaître, 53
- mesh, 5
- MSC Marc, 5, 53
- necking, 6
- parametri
  - costitutivi, 6
  - di danneggiamento, 5
- rampe, 6
- RNB, 6
- routine, 63
- Runge-Kutta, 6, 53, 58
- spostamenti
  - nel piano, 7
- stato di
  - deformazione, 5
  - tensione, 5
  - tensione uniforme, 7
- stress-strain, 63, 67

triassialità, 6

UDAMAG, 54, 58

user sub-routines, 5

zona intagliata, 6

